

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Koneautomaatiotekniikka

2012

Antti Leinonen

# VIHIVAUNU DOLLYVAUNUN KULJETTAMISEEN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

Turun ammattikorkeakoulu

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma | Koneautomaatiotekniikka

31.10.2012 | 51 sivua

Petri Rautio

Antti Leinonen

## VIHIVAUNU DOLLYVAUNUN KULJETTAMISEEN

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää Kine Robot Solutions Oy:lle, onko mahdollista toteuttaa vihivaunu, joka mahtuu dollyvaunun alle ja jolla voidaan kuljettaa dollyvaunuja teollisuuden tuotantotiloissa.

Vihivaunun reitityksen tuli olla mahdollisimman yksinkertainen toteuttaa ja olla helposti uudelleen määritettävissä. Vihivaunun navigointi päädyttiin toteuttamaan sulautetulla elektroniikalla ja työssä tutkittiin navigointianturoinnin toteutusta teoreettisilla kaavoilla ja käytännön testauksilla. Työssä tuli erityisesti huomioida vihivaunun pieni koko ja sen asettamat rajoitukset toteutuksen kannalta. Työssä tarkasteltiin myös dollyvaunulle tyypillisen kuorman tasapainoa ja kuorman vaikutusta vihivaunun voimansiirtoon ja energian kulutukseen.

Vihivaunu on mahdollista valmistaa siten, että navigointiin ja kuorman kuljettamiseen tarvittavat komponentit mahtuvat vihivaunulle määritettyyn tilaan. Toimivan laitteen toteutus vaatii vielä jatkokehitystä mekaniikan ja ohjelmiston osalta.

ASIASANAT:

robotiikka, sulautettu elektroniikka, kinematiikka, automaatio

Antti Leinonen

## AGV FOR DOLLY CARRIAGE TRANSPORTATION

The aim of this thesis was to determine whether it is possible to realize an autonomous guided vehicle (AGV) which fits under a small dolly carriage and can transport the carriage in industrial production facilities. This thesis was initiated by Kine Robot Solutions Inc.

The routing path for the AVG had to be simple to implement and easy to reconfigure. The navigation of the AGV was implemented with embedded electronics and the corresponding navigation sensor was studied both theoretically and through practical testing. It was essential to pay particular attention to the small size of the AGV due to the restrictions caused by the size. Moreover, a typical dolly carriage load balance was examined together with the load effect on the AGV power transmission and energy consumption.

It is possible to build the AGV in such a way that the required navigation and load carrying components of the AGV fit into the defined space. The final implementation of the AGV still requires further development of mechanics and software.

### KEYWORDS:

robotics, embedded electronics, kinematics, automation

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>1 VIHIVAUNULLE ASETETUT VAATIMUKSET</b>	<b>9</b>
<b>2 KULJETETTAVAN KUORMAN TASAPAINO</b>	<b>9</b>
<b>3 VIHIVAUNUN VOIMAN SIIRRON MITOITUS</b>	<b>16</b>
<b>4 VIHIVAUNUN AKKUTYYPIN VALINTA</b>	<b>19</b>
<b>5 VIHIVAUNUN TOIMINTA-AIKA</b>	<b>23</b>
<b>6 VIHIVAUNUN NAVIGOINTI</b>	<b>26</b>
6.1 Navigointianturi	27
6.2 Navigointitavan vaikutus reititykseen	32
6.3 Ajojohtimen virtavahvistin	35
6.4 Navigointianturin prototyypin testaus	39
<b>7 VIHIVAUNUN TOIMINTAPERIAATE</b>	<b>43</b>
<b>8 TULOKSET</b>	<b>45</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>46</b>

## LIITTEET

- Liite 1. Ajosignaalin vastaanotin
- Liite 2. Ajojohtimen virtavahvistin
- Liite 3. A/D muunnin ja I/O
- Liite 4. D/A muunnin ja I/O
- Liite 5. Ajojohtimen reititys

## KUVAT

Kuva 1. Dollyvaunu.	8
Kuva 2. Dollykärryt kuormattuna lasisilla 0,75 l viinipulloilla.	9
Kuva 3. Kuormaan kohdistuvat pitkittäisvoimat kiihdytyksessä.	10
Kuva 4. Kuormaan kohdistuva pitkittäinen vääntömomentti $M_P$ .	10
Kuva 5. Kuormaan kohdistuvat sivuttaisvoimat käännäessä.	12
Kuva 6. Dollyvaunuun kohdistuva poikittainen vääntömomentti $M_{PS}$ .	13
Kuva 7. 8:n sarjaan kytketyn LiFePO <sub>4</sub> akun suojapiirin kytkentä.	21

Kuva 8. $\text{LiFePO}_4$ akun purkauskäyrät: sininen 1 A, punainen 5 A.	22
Kuva 9. $\text{LiFePO}_4$ akun latausalgoritmi.	22
Kuva 10. Ferriittisydäminen 10 $\mu\text{H}$ :n kela.	28
Kuva 11. Rinnakkaisresonanssiipiiri, jossa vastus kuvaa johtimen resistanssia.	29
Kuva 12. Kelaan indusoituvan jännitteen mittausvahvistin.	30
Kuva 13. Kääntävä operaatiovahvistin kytkentä.	31
Kuva 14. Ei-kääntävä operaatiovahvistinkytkentä.	31
Kuva 15. Operaatiovahvistimella toteutettu puolialtotasasuuntain.	32
Kuva 16. Ajojohtimien mitoitus rakennuksen pohjapiirustuksen avulla.	34
Kuva 17. Ajojohtimena käytetyn alumiiniteipin jatkoliitos.	35
Kuva 18. RLC-sarjapiiri.	35
Kuva 19. Ajojohtimessa kulkevan virran aaltomuoto.	36
Kuva 20. Väyläkytketyt virtavahvistimet.	37
Kuva 21. Tähtikytketyt virtavahvistimet.	38
Kuva 22. Vastaanottimen prototyyppi koekytkentälevyllä.	40
Kuva 23. Mikrokontrollerin tuottama pääteasteen ohjaussignaali.	40
Kuva 24. Kela-anturin ja virtavahvistimen testikokoonpano.	41
Kuva 25. Kela-anturilta saatava 0...10 V:n jänniteviesti.	42
Kuva 26. Magneettikentän voimakkuus suurempi sisäkurvissa.	43

## KUVIOT

Kuvio 1. Virtavahvistimen mikrokontrollerin ohjelman vuokaavio.	39
Kuvio 2. Vihivaunun sisäinen viestinvälitys.	44
Kuvio 3. Ajo-ohjeen rakenne.	44

## KAAVAT

Kaava 1. Tarkasteltavan akselin vääntömomentti kohtisuorassa kiihdytyksessä.	11
Kaava 2. Dollyvaunun vääntömomentti poikittaissuunnassa.	13
Kaava 3. Kiihtyvyys, jolla kuorma on tasapainossa reunimmaisilla pyörillä.	14
Kaava 4. Kiihtyvyys, jolla kuorma on tasapainossa takapyörien akselilla.	15
Kaava 5. Tehon tarve kiihdytyksessä.	16
Kaava 6. Ratanopeus.	16
Kaava 7. Vetävän pyörän pyörimisnopeus.	17
Kaava 8. Vetävältä pyörältä saatava vääntömomentti	18
Kaava 9. Vierinvastuskerroin.	24
Kaava 10. Hyötysuhde muutettaessa sähköteho mekaaniseksi tehoksi.	25
Kaava 11. Keskimääräinen teho kiihdytettäessä.	25
Kaava 12. Tehonkulutus tasaisessa liikkeessä.	26
Kaava 13. Pitkän suoran johtimen magneettikenttä.	27
Kaava 14. Magneettivuon tiheys kelan sydämessä.	27
Kaava 15. Kelan yli vaikuttava jännite.	28
Kaava 16. Rinnakkaisresonanssiipiirin resonanssitaajuus.	29
Kaava 17. Kääntävän operaatiovahvistinkytkennän vahvistus.	31
Kaava 18. Ei-kääntävän operaatiovahvistinkytkennän vahvistus.	31
Kaava 19. Operaatiovahvistimella toteutetun puolialtotasasuuntaimen vahvistus.	32
Kaava 20. Ajojohtimen maksimipituus.	33
Kaava 21. RLC-sarjaresonanssiipiirin resonanssitaajuus.	36

## TAULUKOT

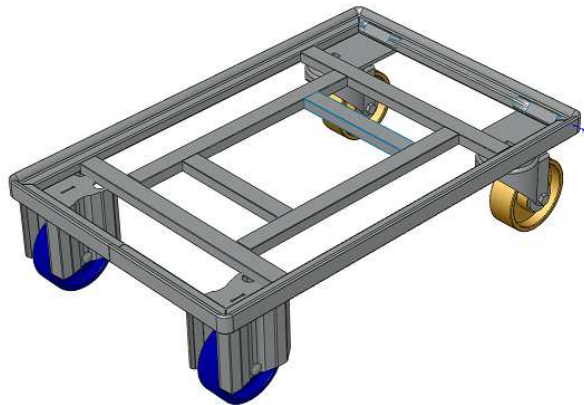
Taulukko 1. Akkutyypien vertailu.	20
Taulukko 2. Kuljetettavan massan muodostavat komponentit.	24
Taulukko 3. Vihivaunun komponenttien ja toimintojen tehonkulutus.	25

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

AGV	vihivaunu, Automated Guided Vehicle
MOSFET	metallioksidipuolijohdekanavatransistori, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
RLC-sarjapiiri	vastuksen, kelan ja kondensaattorin sarjakytkentä
H-siltakytkentä	kytkentä, joka muistuttaa H-kirjainta
mikrokontrolleri	ohjelmoitava mikro-ohjain
DIP	mekaanisesta kytkimestä koostuva komponentti, Dual In line Package
RMS	tehollisarvo, Root Mean Square
verolevy	juovakuparoitu piirilevy

## JOHDANTO

Työni aihe on selvittää Kine Robot Solutions Oy:lle, onko mahdollista toteuttaa vihivaunu, joka mahtuu dollyvaunun (kuva 1) alle ja pystyy kuljettamaan kuormatun dollyvaunun määrättyyn paikkaan. Toteutuksen tulisi olla mahdollisimman kustannustehokas ja yksinkertainen.



Kuva 1. Dollyvaunu.

Käytettävissä oleva tila vaikutti oleellisesti työn toteutukseen. Vihivaunun pienestä koosta johtuen suunnittelussa tuli erityisesti huomioida komponenttivalinnoissa niiden fyysinen koko. Käytettävän tilan puutteen vuoksi työssä päädyttiin toteuttamaan vihivaunun navigointi sulautetulla elektroniikalla, joka vaati syvempää perehtymistä elektroniikkaan ja vaihtosähkötekniikkaan. Vihivaunun voimansiirron mitoituksessa tutkittiin käsiteltävän kuorman tasapainoa ja sen vaikutusta vihivaunun kiihtyvyyksiin ja energiankulutukseen. Vihivaunun toiminta-ajan määrittämistä varten selvitettiin myös eri akkujen ominaisuuksia ja valittiin käyttötarkoitukseen sopivin akkutyyppejä.

Työssä keskityin ratkaisuhakuiseen suunnitteluun ja tein paljon käytännön testauksia, jotta suunnittelun tulokset olisivat myös käytännössä toteuttamiskelpoisia. Työstä on rajattu pois vihivaunun mekaaninen toteutus.



## 1 VIHIVAUNULLE ASETETUT VAATIMUKSET

Vihivaunun tulee mahtua lähes kokonaan dollyvaunun alle ja pystyä kuljettamaan esimerkiksi 150 kg:n viinipullokuormalla lastattua dollyvaunua hallitusti. Lattiataso, jolla vihivaunu kulkee on tasainen betonilattia.

## 2 KULJETETTAVAN KUORMAN TASAPAINO

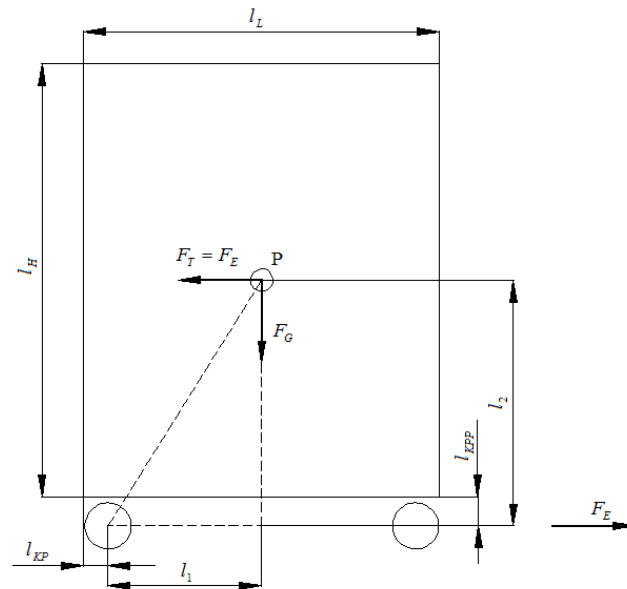
Kuvassa 2 on tyypillinen dollyvaunun kuorma. Kuorma on tuettu dollyvaunuun sidontanauhalla tai pakkauskelmulla. Kuorman massakeskipiste on suhteellisen korkealla.



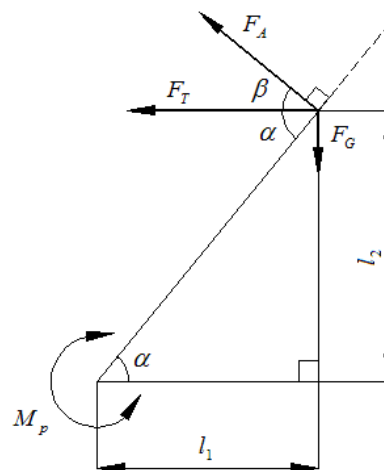
Kuva 2. Dollykärryt kuormattuna lasisilla 0,75 l viinipulloilla.

Kuvassa 3 on esitetty kuorman massakeskipisteeseen kohdistuvat voimat kohtisuorassa kiihdytyksessä. Voimista voidaan laskea suurin sallittu kiihtyvyys, jolla kuorma ei vielä kaadu vaunun takapyörien yli. Voimat pätevät myös

jarrutettaessa, jolloin voimat  $F_E$  ja  $F_T$  ovat vastakkaissuuntaiset. Kuvassa 4 on esitetty kiihdytyksessä vaikuttavat voimat sekä dollyvaunun pyöriin kohdistuva vääntömomentti.



Kuva 3. Kuormaan kohdistuvat pitkittäisvoimat kiihdytyksessä.



Kuva 4. Kuormaan kohdistuva pitkittäinen vääntömomentti  $M_p$ .

Suurimmat sallitut kohtisuorat kiihtyvyydet saadaan laskettua kaavan 1 avulla. Johdetaan kaava 1, jolla saadaan laskettua suurimmat sallitut kohtisuorat kiihtyvyydet. Kiihdytettäessä vääntömomentti  $M_p$  vaikuttaa takapyörillä.

Kuorma ei kaadu kiihdytettäessä, jos vääntömomentti  $M_p$  takapyörillä pysyy negatiivisena. Jarrutettaessa vääntömomentti  $M_p$  vaikuttaa etupyörillä. Kuorma ei kaadu jarrutettaessa, jos vääntömomentti  $M_p$  etupyörillä pysyy positiivisena.

Kaava 1. Tarkasteltavan akselin vääntömomentti kohtisuorassa kiihdytyksessä.

$$M_p = \cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{l_2}{l_1}\right)\right) \cdot m \cdot a \cdot \sqrt{l_2^2 + l_1^2} - m \cdot g \cdot l_1$$

Kaava 1 on johdettu seuraavasti:

$$l_2 = \frac{l_H}{2} + l_{KPP}$$

$$l_1 = \frac{l_L}{2} - l_{KP}$$

$$F_E = m \cdot a$$

$$F_G = m \cdot g$$

$$F_E = F_T$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{l_2}{l_1}\right)$$

$$\beta = 180^\circ - 90^\circ - \alpha$$

$$F_A = \cos \beta \cdot F_T$$

$$M_A = F_A \cdot \sqrt{l_2^2 + l_1^2}$$

$$M_G = F_G \cdot l_1$$

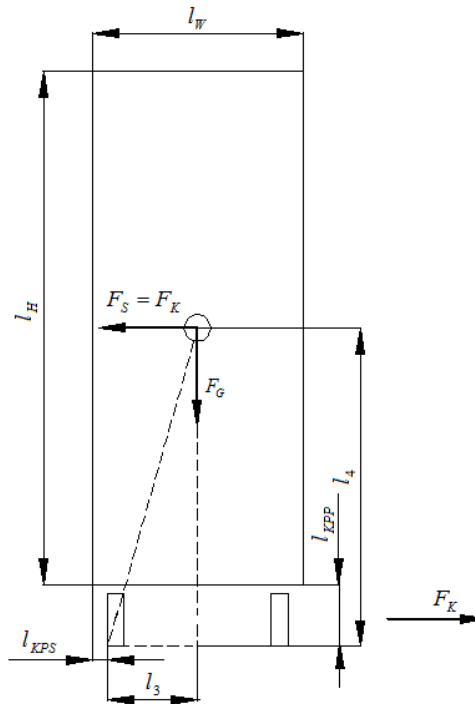
$$M_p = M_A - M_G$$

$$\Rightarrow M_p = F_A \cdot \sqrt{l_2^2 + l_1^2} - m \cdot g \cdot l_1$$

$$\Rightarrow M_p = \cos \beta \cdot F_T \cdot \sqrt{l_2^2 + l_1^2} - m \cdot g \cdot l_1$$

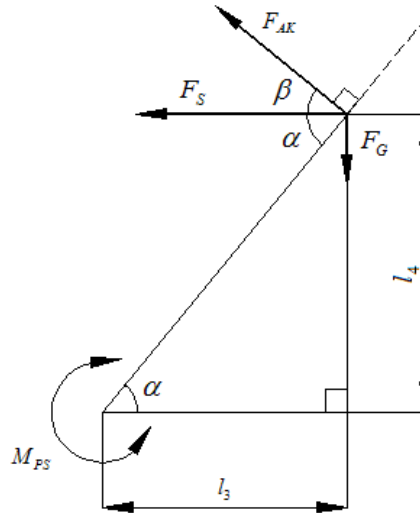
$$\Rightarrow M_p = \cos \left( 180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1} \left( \frac{l_2}{l_1} \right) \right) \cdot m \cdot a \cdot \sqrt{l_2^2 + l_1^2} - m \cdot g \cdot l_1$$

Lasketaan suurin sallittu poikittaishiihtävyys, joilla kuorma ei vielä kaadu. Suurin sallittu poikittaishiihtävyys saadaan laskettua kaavalla 3, joka on johdettu kaavasta 2 olettamalla vääntömomentti  $M_{ps}$  nolaksi. Kuvassa 5 on esitetty kuormaan kohdistuvat poikittaiset voimat, kun oletetaan kiihdytyksen vaikuttavan  $90^\circ$  kulmassa pitkittäissuuntaan nähden.



Kuva 5. Kuormaan kohdistuvat sivuttaisvoimat käännäessä.

Kuvassa 6 on esitetty dollyvaunuun kohdistuva poikittainen vääntömomentti  $M_{PS}$ .



Kuva 6. Dollyvaunuun kohdistuva poikittainen vääntömomentti  $M_{PS}$ .

Kaava 2. Dollyvaunun vääntömomentti poikittaissuunnassa.

$$M_{PS} = \cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{l_4}{l_3}\right)\right) \cdot m \cdot a_s \cdot \sqrt{l_3^2 + l_4^2} - m \cdot g \cdot l_3$$

Kaava 2 on johdettu seuraavasti:

$$l_4 = \frac{l_H}{2} + l_{KPP}$$

$$l_3 = \frac{l_W}{2} - l_{KPS}$$

$$F_K = m \cdot a$$

$$F_S = F_K$$

$$F_G = m \cdot g$$

$$F_s = m \cdot a_s$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{l_4}{l_3}\right)$$

$$\beta = 180^\circ - 90^\circ - \alpha$$

$$F_{AK} = \cos \beta \cdot F_S$$

$$M_K = F_{AK} \cdot \sqrt{l_3^2 + l_4^2}$$

$$M_G = F_G \cdot l_3$$

$$M_{PS} = M_K - M_G$$

$$\Rightarrow M_{PS} = \cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{l_4}{l_3}\right)\right) \cdot m \cdot a_s \cdot \sqrt{l_3^2 + l_4^2} - m \cdot g \cdot l_3$$

Kaava 3. Kiihtyvyys, jolla kuorma on tasapainossa reunimmaisilla pyörillä.

$$a_s = \frac{g \cdot l_3}{\cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{l_4}{l_3}\right)\right) \cdot \sqrt{l_3^2 + l_4^2}}$$

Lasketaan kuorman massakeskipisteen sijainti pyörien reunaan nähden.

$$l_3 = \frac{l_W}{2} - l_{KPS} = \frac{0,4\text{m}}{2} - 0,027\text{m} = 0,173\text{m}$$

$$l_4 = \frac{l_H}{2} + l_{KPP} = \frac{1,04\text{m}}{2} + 0,162\text{m} = 0,682\text{m}$$

Lopuksi saadaan laskettua poikittaiskiihtyvyys, jonka ylittyessä kuorma kaatuu.

$$a_s = \frac{9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,173\text{m}}{\cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{0,682\text{m}}{0,173\text{m}}\right)\right) \cdot \sqrt{((0,173\text{m})^2 + (0,682\text{m})^2)}} = 2,4876 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Lasketaan kohtisuoran kiihdytyksen suurin sallittu kiihtyvyys kaavalla 4, joka on johdettu kaavasta 1 olettamalla vääntömomentti  $M_p$  nolaksi.

Kaava 4. Kiihtyvyys, jolla kuorma on tasapainossa takapyörien akselilla.

$$a_K = \frac{g \cdot l_1}{\cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{l_2}{l_1}\right)\right) \cdot \sqrt{l_1^2 + l_2^2}}$$

Lasketaan kuorman massakeskipisteen sijainti takapyörien akseliin nähden.

$$l_2 = \frac{l_H}{2} + l_{KPA} = \frac{1,04\text{m}}{2} + 0,112 = 0,632\text{m}$$

$$l_1 = \frac{l_L}{2} - l_{KP} = \frac{0,6}{2} - 0,051\text{m} = 0,249\text{m}$$

Lopuksi saadaan laskettua pitkittäiskiihtyvyys, jonka ylittyessä kuorma kaatuu kiihdytettäessä.

$$a_K = \frac{9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,249\text{m}}{\cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{0,632\text{m}}{0,249\text{m}}\right)\right) \cdot \sqrt{(0,249\text{m})^2 + (0,632\text{m})^2}} = 3,8636 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Lasketaan suurin sallittu jarrutuskiihtyvyys.

Ensin lasketaan kuorman massakeskipisteen sijainti etupyörien akseliin nähden.

$$l_2 = \frac{l_H}{2} + l_{KPA} = \frac{1,04\text{m}}{2} + 0,112 = 0,632\text{m}$$

$$l_1 = \frac{l_L}{2} - l_{KP} = \frac{0,6}{2} - 0,06\text{m} = 0,24\text{m}$$

Lopuksi saadaan laskettua pitkittäiskiihtyvyys jarrutettaessa. Kun pitkittäiskiihtyvyys ylittyy kuorma kaatuu.

$$a_J = \frac{9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,24\text{m}}{\cos\left(180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{0,632\text{m}}{0,24\text{m}}\right)\right) \cdot \sqrt{((0,24\text{m})^2 + (0,632\text{m})^2)}} = 3,7240 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

### 3 VIHIVAUNUN VOIMAN SIIRRON MITOITUS

Tarvittava moottoriteho määräytyy käytännössä siitä, kuinka nopeasti kiihdytetään haluttuun nopeuteen. Mitä suurempi kiihtyvyys sitä suurempi on tehon tarve. Kiihdytykseen tarvittava tehon tarve voidaan laskea kaavalla 5.

Kaava 5. Tehon tarve kiihdytyksessä.

$$P = m \cdot a \cdot v$$

Kuorma ei kaadu, kun luvussa 3 laskettuja kiihtyvyyksiä ei ylitetä. Moottorien tehon mitoituksessa voidaan käyttää kiihtyvyyttä, joka on noin kolmasosa suurimmasta sallitusta kuormaan kohdistuvasta kiihtyvyydestä. Suurin sallittu kiihtyvyys, joka kuormalle sallitaan, saa vaikuttaa poikittaissuunnassa ja olla suuruudeltaan n.  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Kolmasosa on siis n.  $0,8 \text{ m/s}^2$ , jonka voi pyöristää  $1 \text{ m/s}^2$ .

Lasketaan tehon  $P_M$  tarve  $155 \text{ kg}$ :n kuormalla nopeuden ollessa  $3 \text{ km/h}$  ja kiihtyvyyden  $1 \text{ m/s}^2$ .

$$P_M = 155\text{kg} \cdot 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \cdot \frac{1000\text{m}}{1\text{km}} = 129,166\text{W} \approx 130\text{W}$$

Vetävältä akselilta vaaditaan n.  $130 \text{ W}$ :n keskimääräinen teho kiihdytykseen tarvittavalla kierrosalueella. Moottorin pyörimisnopeus täytyy mitoittaa halutun ajonopeuden mukaan, eli vetävän pyörän ratanopeuden mukaan (kaava 6).

Kaava 6. Ratanopeus.

$$v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r$$

Vetävän pyörän halkaisijaksi voidaan arvioida  $100 \text{ mm}$ .  $100 \text{ mm}$ :n kokoinen pyörä mahtuu vielä dollyvaunun alle. Lasketaan vetävän pyörän



pyörimisnopeus  $n$ , kaavalla 7, joka on johdettu kaavasta 6. Pyörän säde on 50 mm ja ratanopeus nopeus 3 km/h.

Kaava 7. Vetävän pyörän pyörimisnopeus.

$$n = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

$$n = \frac{3 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{2 \cdot \pi \cdot 0,05\text{m}} \cdot \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} \cdot \frac{1000\text{m}}{1\text{km}} = 159,155 \frac{1}{\text{min}} \approx 160 \frac{1}{\text{min}}$$

Havaitaan, että vetävän pyörän pyörimisnopeus on suhteellisen pieni verrattuna harjattomien tasavirtamoottoreiden nimellispyörimisnopeuksiin. Harjattomien tasavirtamoottoreiden pyörimisnopeudet ovat Maxon Motorin valikoimassa luokkaa  $1630 \dots 76400 \text{ min}^{-1}$  (Maxon motor 2012a). Voimansiirtoon tarvitaan näin ollen moottorin lisäksi myös sopiva alennusvaihde, jotta haluttu pyörimisnopeus saadaan vetävälle akselille. Moottorin valintaan vaikuttaa myös käytettävissä oleva virtalähde.

Alue, jossa vihivaunu liikkuu, voi olla hyvin laaja ja reitti vaihteleva, joten kaapelisyöttö ei ole mahdollinen. Virtalähteenä pitää tästä syystä käyttää akkua. Akkukäyttö määrää osaltaan valittavan moottorin nimellisjännitteen sekä moottorinohjaimen syöttöjännitteen. Akun jännitteen voidaan olettaa olevan 6...48 V suuruusluokkaa. Vihivaunun ohjaus voidaan toteutetaan kahdella harjattomalla tasavirtamoottorilla, jotka kiinnitetään laakeroituun kääntökehään. Vaunun kulkusuuntaa saadaan ohjattua säätämällä vetävien pyörien pyörimisnopeuseroa.

Vihivaunun pienestä koosta johtuen moottoreiksi valittiin Maxon Motorin litteät 24 V:n ja 90 W:n hall-antureilla varustetut tasavirtamoottorit (Maxon motor 2012a). Moottorin nimellispyörimisnopeus on  $2650 \text{ min}^{-1}$  ja nimellisvääntömomentti 387 mNm. Alennusvaihteiksi valitaan  $i = 1/19$  välityssuhteen omaavat moottoreihin suoraan sopivat alennusvaihteet (Maxon motor 2012b). Alennusvaihteen akselilta otettava jatkuva vääntömomentti saa

olla enintään 15 Nm ja hetkellisesti 22,5 Nm. Moottorin pyörittäessä nimellispyörimisnopeudella alennusvaihdetta, jonka akselille on kytketty 100 mm halkaisijaltaan oleva pyörä, saadaan ratanopeudeksi n. 2,6 km/h. Nopeus 3 km/h saadaan kasvattamalla moottorin pyörimisnopeus  $3024 \text{ min}^{-1}$ .

Vetäviltä pyöriltä saatava suurin sallittu jatkuva vääntömomentti  $M_{n \max}$  nopeudella 2,6 km/h saadaan laskettua kaavalla 8, kun tiedetään vetävien moottorien määrä, suurin sallittu jatkuva vääntömomentti nimellispyörimisnopeudella  $M_{m \max} = 0,387 \text{ Nm}$ , alennusvaihteen välitys suhde  $i = 1/19$  ja alennusvaihteen hyötysuhde  $\eta = 0,85$ .

Kaava 8. Vetäviltä pyöriltä saatava vääntömomentti

$$M_{n \max} = \frac{M_{m \max} \cdot \eta}{i}$$

$$M_{n \max} = 0,387 \text{ Nm} \cdot 2 \cdot 19 \cdot 0,85 = 12,5 \text{ Nm}$$

Havaitaan, että alennusvaihteen suurin sallittu jatkuva vääntömomentti ei ylitä. Vääntömomentti, jolla moottorin roottori ei pysty enää kääntymään staattorin magneettikentän vaikutuksesta on 4670 mNm. Suurin vääntömomentti  $M_{p \max}$ , joka moottorilta voidaan saada vetäville pyörille alennusvaihteen akselilta on laskettu sijoittamalla arvot kaavaan 8.

$$M_{p \max} = 4,67 \text{ Nm} \cdot 19 \cdot 0,85 = 75,42 \text{ Nm} \approx 75,4 \text{ Nm}$$

Huomataan, että suurin sallittu alennusvaihteen akselilta saatava hetkellinen vääntömomentti on mahdollista ylittää valitulla moottorityypillä. Moottorin vääntömomenttia kiihdytettäessä ja jarrutettaessa voidaan rajoittaa moottoriohjaimella. Moottoriohjaimiksi valittiin Maxon Motorin valmistamat DEC 70/10 tyyppiset moottoriohjaimet (Maxon motor 2012c).

Todellisen tehotarpeen laskemiseen tarvitaan kuorman massan lisäksi vihivaunun massa, joka taas määräytyy käytettävien komponenttien mukaan. Eniten vihivaunun omaan massaan vaikuttaa rungon, moottorien, alennusvaihteiden ja akkujen massat.

## 4 VIHIVAUNUN AKKUTYYPIN VALINTA

Akun valintakriteereiksi asetettiin seuraavat asiat:

- Akun napajännite täytyy olla suurempi, kuin suurimman jännitteen vaativa komponentti, jotta kaikille vihivaunun komponenteille voidaan reguloida riittävän suuri syöttöjännite.
- Vihivaunun pienestä koosta johtuen akulla tulee olla mahdollisimman suuri energiatiheys tilavuuden suhteen. Akkujen energiatheyttä kuvataan wattitunteina litraa kohti (Wh/l).
- Akun tulee sietää syväpurkausta ja se on voitava ladata, vaikka akku ei olisi tyhjä ilman, että akun käyttöikä kärsii merkittävästi. Akkua ei välttämättä koskaan pureta kokonaan tyhjäksi, koska vihivaunun toiminta-aika voi olla hyvin satunnainen. Kun vihivaunulla ei ole tehtävää, ohjataan se latauspisteelle lataukseen.
- Akun tulee koostua suhteellisen pienistä akkukennoista, jotka voidaan liittää toisiinsa juottamalla tai pistehitsaamalla. Vihivaunun pienestä koosta johtuen akku voidaan joutua rakentamaan muotoon, jollaista ei ole markkinoilla valmiiksi saatavilla

Tarkasteluun otettiin mukaan akkutyyppejä, joista voidaan rakentaa halutun muotoinen akku. Vertailtavat akkutyypit ovat nikkelikadmium (NiCd), nikkelimetallihybridi (NiMH), litiumrautafosfaatti (LiFePO<sub>4</sub>) ja litiumioni (Li-Ion).

Taulukon 1 akkutyypin vertailusta käy ilmi, että sopivin akkutyyppi on litiumrautafosfaattiakku. Se täyttää kaikki vaaditut kriteerit ja on tällähetkellä myös kehittynein akkutyyppi, jota käytetään sähköautoissa (Lehtinen, J. 2010).

Akkutyyppiä valitaan litiumrautafosfaattiakku, jonka tyypillinen kennojännite on 3,2 V täysinäisenä ja tyhjänä 2,0 V. Litiumrautafosfaattiakku voidaan valmistaa käsityönä akkukennoista, jolloin akun muoto voidaan määrittää vihivaunun sisäisen mekaniikan mukaan.

Taulukko 1. Akkutyyppien vertailu (Honkanen, H. 2012 ja Woodbank communications Ltd 2012).

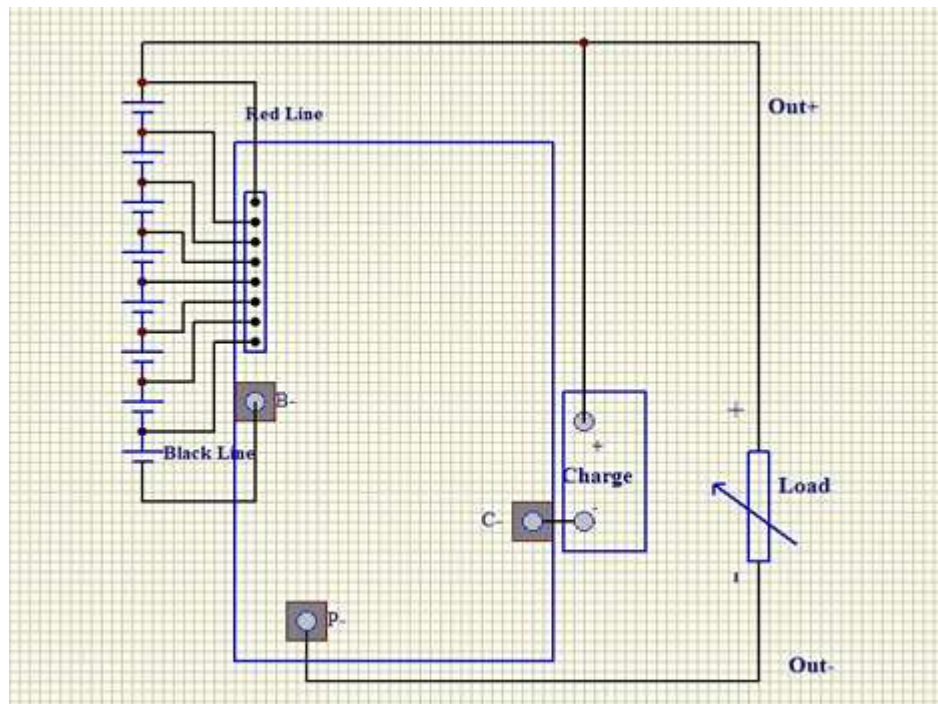
	NiCd	NiMH	LiFePO <sub>4</sub>	Li-Ion
Kennojännite (V)	1,2	1,2	3,2	3,6
Tarvittava kennomäärä 24V:n napajännitteelle	29	29	8	7
Energiatiheys tilavuuden suhteen (Wh/l)	40-60	30-80	250	270
Voidaan syväpurkaa	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei
Käyttöikä latauskertoina	2000	1500	2000	1200
Käyttölämpötila (C°)	-40...60	-20...60	-20...60	-20...60
Lataustapa	Vakiovirta	Vakiovirta	Vakiovirta ja jännite	Vakiovirta ja jännite

Tarkoitukseen sopiva akku voidaan valmistaa esimerkiksi Tenergy Corporationin valmistamista 3,2 V ja 20 Ah LiFePO<sub>4</sub> kennoista (Tenergy Corporation, 2012a). Kennojen ulkomitat ovat korkeus: 11,5 mm, pituus: 200 mm ja leveys: 143 mm. Kytkeällä kymmenen kennoa sarjaan saadaan 32 V:n nimellisnapajännite ja 20 Ah:n kapasiteetti. Akun energiatiheys tilavuuden suhteen on n. 216 Wh/l.

Sarjaan kytketyille akkukennoille tarvitaan lisäksi suojapiiri, joka estää akustoa ylilataukselta, liian suurelta purku- tai latausvirralta, liian suurelta lämpötilalta, kennon oikosuluta sekä syväpurkaukselta. Suojapiiri myös tasapainottaa sarjaan kytketyt akut, jolloin kaikki akut latautuvat tasaisesti.

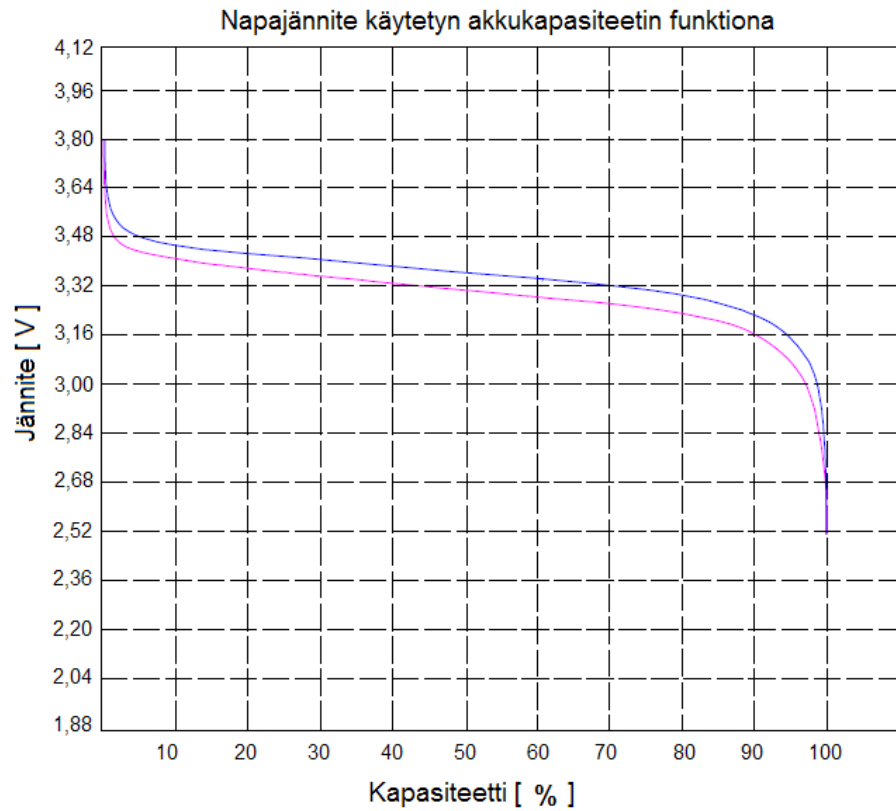
Epätasapainon akkujen kuormituksessa aiheuttaa poikkeamat akkujen sisäisissä resistansseissa. Pienimmän sisäisen resistanssin omaava akkukenno purkautuu nopeammin, kuin suuremman resistanssin omaavat kennot. Epätasapainoa aiheuttaa myös kennojen kapasiteettipoikkeamat. Sopiva

suojapiiri edellämainitulle 32 V:n akustolle on esimerkiksi Tenergy Corporationin suojapiiri 10S LFP PCM (Tenergy Corporation, 2012b), joka on tarkoitettu 10:lle sarjaan kytketylle kennolle. Kuvassa 7 on 8 sarjaan kytketyn kennon suojapiirin kytkentä.

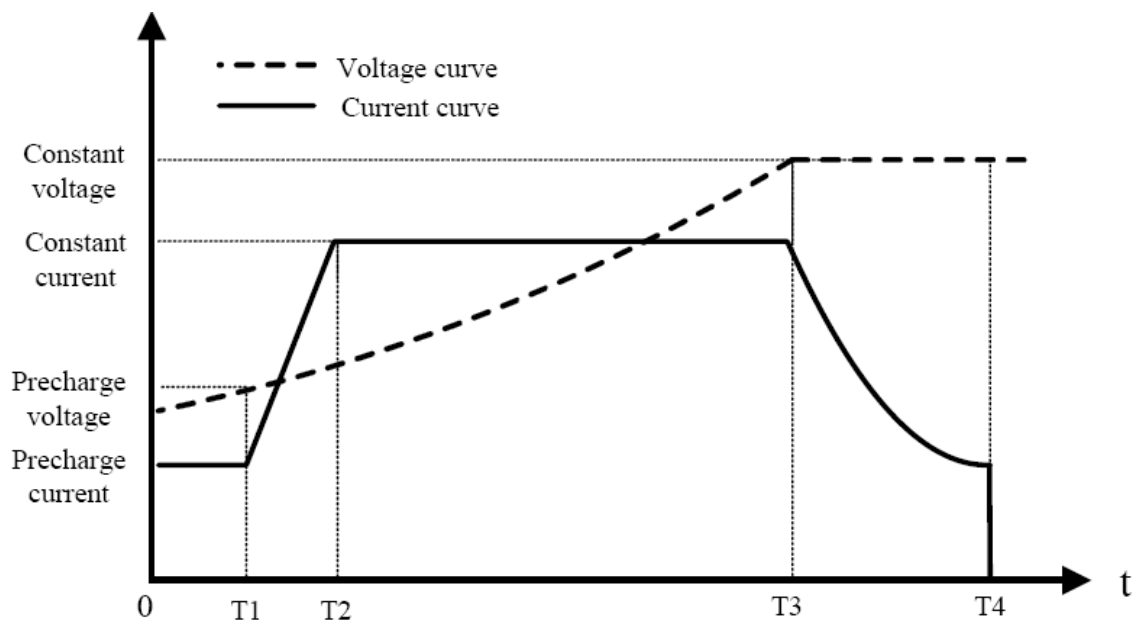


Kuva 7. 8:n sarjaan kytketyn  $\text{LiFePO}_4$  akun suojapiirin kytkentä. (Tenergy Corporation, 2012b)

$\text{LiFePO}_4$  akkujen käytettävissä oleva kapasiteetti on tyypillisesti 80 %. Käytettävä kapasiteetti pienenee purkuvirran kasvaessa johtuen akun sisäisen resistanssin muodostamista lämpöhäviöistä. Kuvassa 8 on Tenergy Corporationin 5 Ah:n akkukennon purkauskäyrät (Tenergy Corporation, 2012c). Punaisellakäyrällä on esitetty purkuvirran kasvun aiheuttama käytettävän kapasiteetin alenema. Vihivaunun käytettäväksi akkukapasiteetiksi voidaan määrittää 70 %, jolloin vaunun täytyy mennä viimeistään lataukseen. 20 Ah:n akkukapasiteetista on siis käytettävissä 14 Ah.



Kuva 8. LiFePO<sub>4</sub> akun purkauskäyrät: sininen 1 A, punainen 5 A (Tenergy Corporation, 2012c)



Kuva 9. LiFePO<sub>4</sub> akun latausalgorithmi (Tenergy Corporation, 2012d).

Akun latausaika voidaan arvioida, kun tiedetään käytetty akkukapasiteetti ja latausalgorithmi. Tenergy Corporationin 10 sarjaankytketyn  $\text{LiFePO}_4$ -akun laturi (Tenergy Corporation, 2012d) käyttää kuvan 9 latausalgorithmia, jossa on neljä vaihetta T1, T2, T3 ja T4. Esilatausvaihe 0 - T1 aktivoituu, kun kennojännite on alle 2,5 V. Vaihe T1–T2 aktivoituu, kun kennojännite on  $\geq 2,5$  V, jolloin latausvirta nostetaan 3 A:n pikalatausvirran tasolle. Vaiheessa T2–T3 akkua ladataan 3 A:n vakiovirralla, kunnes akun jännite saavuttaa 3,65 V. Vaiheessa T3–T4 akkua ladataan vakiojännitteellä, kunnes latausvirta on laskenut kymmenesosaan pikalatausvirrasta. Latausvaihe, joka aktivoituu, kun akku laitetaan lataukseen riippuu sen napajännitteestä.

Kun vihivaunun 20 Ah:n ja 32 V:n akun kapasiteetista käytetään enintään 70 %, akun kennojännite on yhä noin 3,2 V. Tällöin aktivoituu latausvaihe T1–T2, jonka jälkeen akkua ladataan vakiovirralla (vaihe T2–T3). Latausaika voidaan arvioida vakiovirtalatausjakson pohjalta. Kun akun kapasiteetista on käytetty 70 % kestää akun lataus kestää vähintään noin 4,7 h. Latausaika saadaan laskettua jakamalla käytetty akkukapasiteetti vakiolatausvirralla.

## 5 VIHIVAUNUN TOIMINTA-AIKA

Toiminta-aikaan vaikuttaa navigointiin tarvittavan elektroniikan tehon kulutus. Vihivaunun liikkeessä sen toiminta-aikaan vaikuttaa lisäksi pysähdysten määrä, kiihdytyksien voimakkuus ja kuljetettavan kuorman massa.

Vihivaunun kulkiessa tasaisella alustalla vakionopeudella tehoa kuluu pyörien laakereiden kitkavoimien voittamiseen. Voima, joka tarvitaan pitämään kuljetettava kuorma liikkeessä, arvioitiin määrittämällä dollyvaunulle vierinvastuskerroin. Kun tiedetään kuorman paino voidaan vierinvastuskertoimen avulla laskea tarvittava teho, joka tarvitaan vaunun nopeuden ylläpitämiseen. Vierinvastuskerroin  $f$  saatiin laskettua kaavalla 9, jossa  $F_V$  on vierinvastusvoima,  $F_N$  pyörien tukivoima ja  $r$  pyörän säde.

Kaava 9. Vierinvastuskerroin.

$$f = \frac{F_V \cdot r}{F_N}$$

Vierinvastusvoima sisältää kaikki dollyvaunun vierimistä vastustavat voimat. Vierinvastusvoima määritettiin kolmella kuormatulla dollyvaunulla. Kukin vaunu ja kuorma painoivat yhteensä 162 kg. Vaunuja vedettiin tasaisella betonilattialla. Vetovaa'alla mitattiin tasaisen liikkeen ylläpitämiseen tarvittava voima. Vierinvastusvoiman keskiarvoksi saatiin 5,4 N ja vierinvastuskertoimeksi  $1,69 \cdot 10^{-4}$  m, joka on laskettu kaavalla 9.

$$f = \frac{5,4\text{N} \cdot 0,05\text{m}}{162\text{kg} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 1,69 \cdot 10^{-4} \text{ m} \approx 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Vihivaunun toiminta-aika riippuu sen toimista. Toiminta-ajan määrittämistä varten laskettiin vihivaunun eri komponenttien ja toimintojen tehonkulutus. Viitteellinen toiminta-aika pystytään laskemaan, kun tunnetaan kuljettavan reitin pituus ja pysähdysten määrä. Taulukossa 3 on esitetty vihivaunun komponenttien ja toimintojen energiankulutukset ja taulukossa 2 kuljetettavan kuorman massan muodostavat komponentit.

Taulukko 2. Kuljetettavan massan muodostavat komponentit.

	Massa [kg]
Moottorit ja alennusvaihteet	2,44
Moottoriohjaimet	0,80
20Ah LiFePO <sub>4</sub> akku	5,85
Runko	8,00
Sekalaiset komponentit	3,00
<b>Vihivaunun omamassa yhteensä</b>	<b>20,09</b>
Kuorma	155,00
Dollyvaunu	7,00
<b>Kokonaismassa kuorman kanssa</b>	<b>182,09</b>



Taulukko 3. Vihivaunun komponenttien ja toimintojen tehonkulutus.

Komponentti tai toiminto	Tehonkulutus [W]	Aika [s]	Huomioitavaa
Keskusyksikkö ja elektroniikka	50	1	Tehonkulutus on arvioitu.
Voimansiirto kiihdytettäessä	33	0,83	kiihtyvyys $0,5 \text{ m/s}^2$ , loppunopeus $1,5 \text{ km/h}$ , kuorman kanssa
Voimansiirto kiihdytettäessä	15,6	0,69	kiihtyvyys $1,0 \text{ m/s}^2$ , loppunopeus $2,5 \text{ km/h}$ , ilman kuormaa
Ajo vakionopeudella betonilattialla	3,7	1	$1,5 \text{ km/h}$ , kuorman kanssa
Ajo vakionopeudella betonilattialla	0,3	1	$2,5 \text{ km/h}$ , ilman kuormaa

Voimansiirrossa huomioitiin kokonaishyötysuhde, joka laskettiin kaavalla 10. Voimansiirron kokonaishyötysuhde koostuu moottorien  $\eta_m$  (Maxon motor 2012a), moottoriohjaimien  $\eta_{mo}$  (Maxon motor 2012c), alennusvaihteiden  $\eta_{av}$  (Maxon motor 2012b) ja hammashihnavälityksen  $\eta_{hh}$  (Airila M. et. al. 2003) hyötysuhteista.

Kaava 10. Hyötysuhde muutettaessa sähköteho mekaaniseksi tehoksi.

$$\eta_{kok} = \eta_m \cdot \eta_{mo} \cdot \eta_{av} \cdot \eta_{hh}$$

$$\eta_{kok} = 0,83 \cdot 0,95 \cdot 0,83 \cdot 0,93 = 0,608 \approx 0,6$$

Vihivaunun keskimääräiset tehonkulutukset kiihdytettäessä laskettiin käyttämällä kaavaa 11.

Kaava 11. Keskimääräinen teho kiihdytettäessä.

$$P = \frac{(F + F_v) \cdot v}{\eta_{kok} \cdot 2}$$

Esimerkiksi taulukon 3 kohdan 2 tehonkulutus on laskettu seuraavasti.

$$P = \frac{(182,09\text{kg} \cdot 0,5\text{m/s}^2 + 5,4\text{N}) \cdot \left(\frac{1,5\text{km/h}}{3,6\text{km/h}}\right)\text{m/s}}{0,608 \cdot 2} = 33,047\text{W}$$

Kuljetettava kuorma vaikuttaa vierinvastusvoimaan, joten vierinvastusvoima tulee laskea tarvittaessa kuorman mukaan. Vihivaunun vierinvastusvoimaa ei ole tässä huomioitu, koska kyseinen voima määräytyy pyörien halkaisijan ja materiaalin mukaan.

Tehonkulutukset kuljettaessa tasaisella nopeudella laskettiin kaavalla 12.

Kaava 12. Tehonkulutus tasaisessa liikkeessä.

$$P = \frac{F_v \cdot v}{\eta_{\text{kok}}}$$

Esimerkiksi taulukon 3 kohdan 4 tehonkulutus on laskettu seuraavasti.

$$P = \frac{5,4\text{N} \cdot \left(\frac{1,5\text{km/h}}{3,6\text{km/h}}\right)\text{m/s}}{0,608} = 3,7\text{W}$$

## 6 VIHIVAUNUN NAVIGOINTI

Vihivaunu sijaitsee dollyvaunun alla lattianrajassa ja reitti, jolla vaunun tulee kulkea voi olla ympäröity hyllyillä ja kuormalavapinoilla. Mahdollisia navigointiin käytettäviä anturointi menetelmiä ovat laser, pintojen etäisyysmittaus, magneettinauha, magneettimerkki, optinen nauhan seuranta ja induktiivinen johtimen seuranta. Valmiita vihivaunun navigointijärjestelmiä valmistaa mm. MRS-automation, Kollmorgen ja Savant Automation Inc. Kyseisten valmiiden AGV järjestelmien toimittajien navigointijärjestelmien asentaminen vihivaunulle määritettyyn tilaan on mahdotonta johtuen komponenttien suurista fyysisistä mitoista.

Vihivaunun navigointi päätettiin toteuttaa itse seuraamalla lattiaan asennettua johdinta.

## 6.1 Navigointianturi

Lattiassa kulkevaan johtimeen syötetään pieni vaihtovirta, jolloin sen ympärille muodostuu magneettikenttä. Johtimen magneettikentän voimakkuutta mitataan kahdesta kelasta ja vahvistimesta koostuvalla kela-anturilla. Keloihin indusoituneen jännitteen perusteella saadaan selville kelojen sijainti ajojohtimeen nähden. Jotta ajojohtimen magneettikentästä saataisi muodostettua jännite- tai virtaviesti, joka kertoo vihivaunussa sijaitsevan kahdesta kelasta koostuvan kela-anturin poikkeaman ajojohtimeen nähden, täytyy vaunun vastaanottimelle laskea ajojohtimen magneettikentän ja vastaanotinkelojen mukaan vahvistinpiiri, joka muodostaa sopivan suuruisen viestin. Vahvistinkytkentä päätettiin toteuttaa itse johtuen vihivaunun pienestä koosta.

Kun ajojohtimeen syötetään vaihtovirta, jonka suuruus tunnetaan, voidaan johtimessa kulkevan vaihtovirran synnyttämä magneettikentän voimakkuus laskea tunnetulla etäisyydellä kaavalla 13.

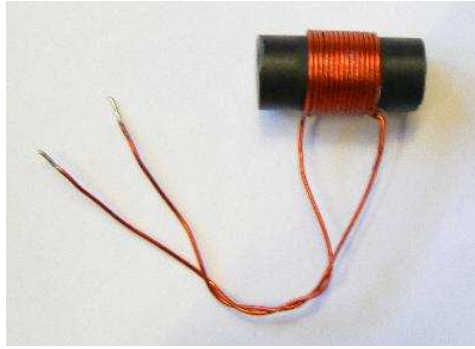
Kaava 13. Pitkän suoran johtimen magneettikenttä.

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Kun magneettikentän voimakkuus tunnetaan, voidaan laskea vastaanotinkelan magneettivuon tiheys kaavalla 14. Tässä oletetaan, että magneettikentän voimakkuus kelan sisällä on tasainen.

Kaava 14. Magneettivuon tiheys kelan sydämessä.

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$



Kuva 10. Ferriittisydäminen 10 µH:n kela.

Kelaan indusoituvan jännitteen tarkastelussa käytettiin kuvan 10 kela. Kelaan indusoituvan jännitteen (kaava 15) tarkastelussa oletettiin ajojohtimen syöttövirraksi 200 mA ja taajuudeksi 30 kHz.

Kaava 15. Kelan yli vaikuttava jännite.

$$U = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot A \cdot B$$

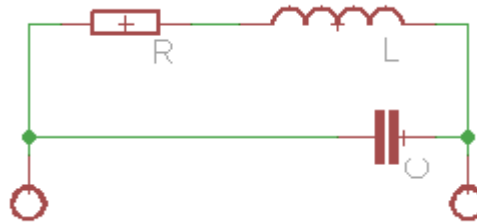
Lasketaan kelaan indusoituva jännite, kun sen etäisyys  $r$  ajojohtimesta on 50 mm. Kelan halkaisija  $d = 10$  mm, kierrosmäärä  $N = 14$  ja kelan sydämen suhteellinen permeabiliteetti  $\mu_r = 45$ . Kaavoista 13, 14 ja 15 voidaan johtaa kaava, jolla saadaan laskettua kelan jännite.

$$U = \frac{f \cdot N \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot I}{4 \cdot r}$$

$$U = \frac{30000 \text{ kHz} \cdot 14 \cdot \pi \cdot (0,01 \text{ m})^2 \cdot 45 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,2 \text{ A}}{4 \cdot 0,05 \text{ m}} = 2,375 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Vastaanottimen kelaan indusoitunut vaihtojännite on suuruudeltaan hyvin pieni. Tästä johtuen vastaanottimen kela ei voida kuormittaa juuri ollenkaan, jotta jännitemuutokset vastaanottimen kelalla voidaan havaita. Kela täytyy siis kytkeä osaksi hyvin suuri impedanssissta piiriä. Kelan ja kondensaattorin muodostama rinnakkaisresonanssi piiri soveltuu tähän tarkoitukseen hyvin, sillä resonanssitaajudella sen virta on pienimmillään ja sen yli vaikuttava jännite suurimmillaan. Resonanssitaajuudesta poikkeavat signaalit vaimenevat

resonanssitaajuudesta etäännyttäessä. Tämä ilmiö suodattaa osaltaan häiriösignaaleja.



Kuva 11. Rinnakkaisresonanssiipiiri, jossa vastus kuvaa johtimen resistanssia.

Kelaan indusoituvan jännitteen tarkastelussa käytetylle 10  $\mu\text{H}$ :n kelalle (kuva 10) saadaan mitoitettua kondensaattori, jonka kanssa rinnan kytkettynä se muodostaa rinnakkaisresonanssiipiirin (kuva 11). Rinnakkaisresonanssiipiirin resonanssitaajuus saadaan laskettua kaavalla 16.

Kaava 16. Rinnakkaisresonanssiipiirin resonanssitaajuus.

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R^2 \cdot C}{L}}$$

Resonanssitaajuudeksi valittiin 30 kHz. Kelan johtimen resistanssia ei huomioitu.

$$C = \frac{\left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 30000 \text{ Hz}} \right)^2}{10 \cdot 10^{-6} \text{ H}} = 2,8145 \cdot 10^{-6} \text{ F} \approx 2,8 \mu\text{F}$$

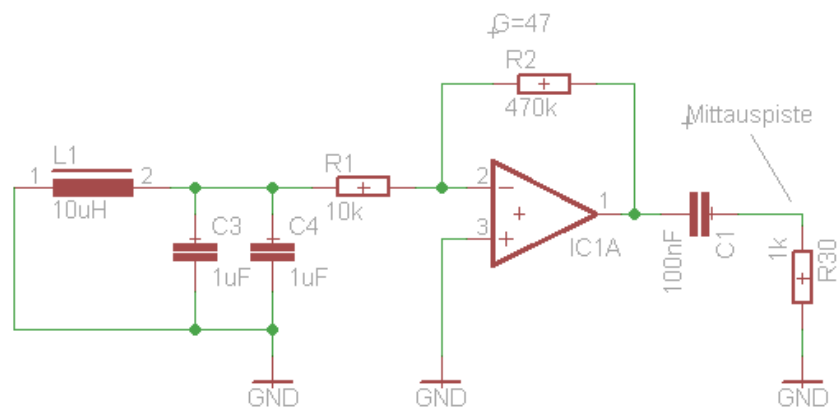
Vastaanottimen rinnakkaisresonanssiipiirin yli vaikuttava vaihtosähköinen signaali täytyy vahvistaa ja muuttaa sopivan suuruiseksi tasajänniteviestiksi, jotta tieto kelojen poikkeamasta ajojohtimeen nähden olisi helposti käytettävissä.

Pienen vaihto- tai tasajännitteen vahvistamiseen soveltuu esimerkiksi operaatiovahvistin tai instrumentointivahvistin. Kelaan indusoituvan

laskennallisen jännitteen paikkansapitävyys testattiin kuvan 12 mukaisella kytkennällä, jonka vahvistus on 47.

Vastuksen R30 yli vaikuttava jännite mitattiin kelan akselin ollessa 50 mm etäisyydellä ajojohtimesta, jossa kulki 35,5 kHz:n taajuinen ja 200 mA:n suuruinen virta. Vastaanottimesta mitattu jännite oli lähes sinimuotoinen noin 320 mV huipusta-huippuun, jolloin RMS arvoksi saadaan 2,4 mV kelan yli.

Mittaustulos vastaa laskettua arvoa, kun otetaan huomioon, että lasketussa kelan yli vaikuttavassa jännitteessä ei ole otettu huomioon komponenttien toleranssien ja mittalaitteen muodostamia virheitä. Absoluuttisella vahvistuksella ei käytännössä ole suurta merkitystä. Riittää, että signaali saadaan vahvistettua käytettävälle tasolle, sillä keloihin indusoituneita jännitteitä verrataan toisiinsa.

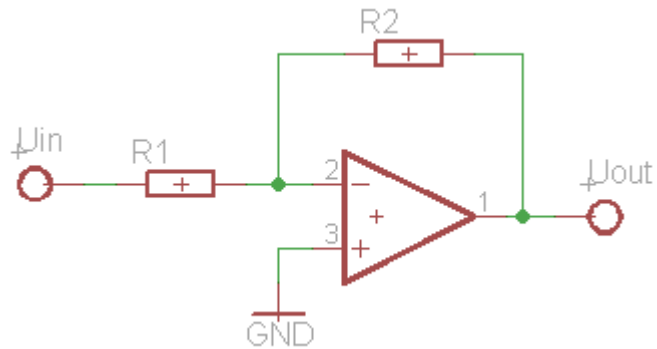


Kuva 12. Kelaan indusoituvan jännitteen mittausvahvistin.

Vastaanottimen (Liite 1) kytkentä mitoitettiin olettamalla, että kelaan indusoituu muutaman millivoltin suuruinen jännite, joka pitää vahvistaa joko 0...10 V tai  $\pm 10$  V:n tasoiseksi jänniteviestiksi. Vastaanottimelta saatava jänniteviesti vastaa kelojen poikkeamaa ajojohtimeen nähden. Vahvistinkytkentään mitoitettiin myös säädettävä kentänvoimakkuuden mittaus, jotta anturilta saadaan tieto milloin muodostettuun jänniteviestiin voidaan luottaa.

Vastaanottimen vahvistimessa käytetyt operaatiovahvistinpiirikytkennät on esitetty kuvissa 13, 14, ja 15. Kuvassa 13 kääntävä vahvistin kytkentä, jonka

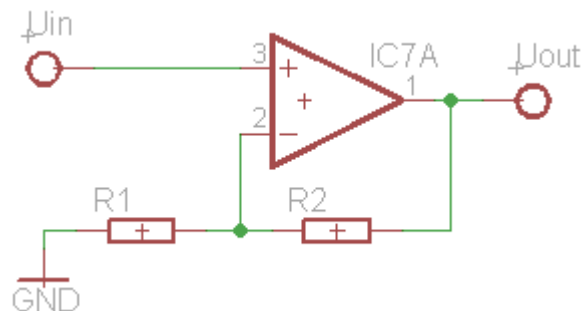
vahvistus saadaan laskettua kaavalla 17. Kuvassa 14 ei kääntävä operaatiovahvistin kytkentä, jonka vahvistus saadaan laskettua kaavalla 18. Kuvassa 15 operaatiovahvistimella toteutettu puoliaaltotasasuuntain, jonka vahvistus saadaan laskettua kaavalla 19.



Kuva 13. Kääntävä operaatiovahvistin kytkentä.

Kaava 17. Kääntävän operaatiovahvistinkytkennän vahvistus.

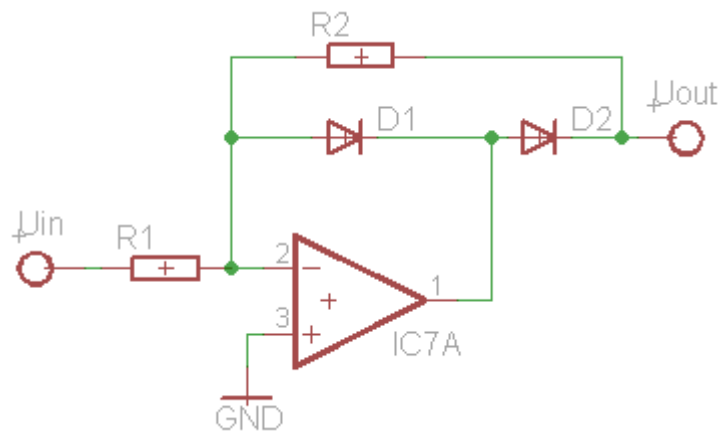
$$U_{out} = -U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



Kuva 14. Ei-kääntävä operaatiovahvistinkytkentä.

Kaava 18. Ei-kääntävän operaatiovahvistinkytkennän vahvistus.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$



Kuva 15. Operaatiovahvistimella toteutettu puolialtotasasuuntain.

Kaava 19. Operaatiovahvistimella toteutetun puolialtotasasuuntaimen vahvistus.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R2}{R1}$$

## 6.2 Navigointitavan vaikutus reititykseen

Ajojohtimena voidaan käyttää lähes mitä tahansa johdinta, jossa saadaan kulkemaan riittävän suuri vaihtovirta. Silmukassa kulkeva maksimivirta määräytyy johtimen materiaalin resistiivisyyden, poikkipinta-alan, pituuden ja syöttöjännitteen mukaan.

Ajojohdin voidaan asentaa valmiin lattian pintaan tai sen sisään jyrsimällä lattiaan ura, johon johdin upotetaan. Mikäli johdin asennetaan lattian pintaan se ei saa muodostaa kynnystä, jonka yli vihivaunu ei pääse kulkemaan kuorman kanssa. Näin ollen poikkipinnaltaan pyöreän johtimen resistanssi on suurempi kuin yhtäpitkän poikkipinnaltaan suorakaiteen muotoisen, ohuen ja leveän johtimen resistanssi.

Pinta-asennuksessa voidaan käyttää esimerkiksi kuparifoliota tai kupariteippiä. Pinta-asennettuja kuparifoliosta koostuvia induktiosilmukoita käytetään myös tiloissa, joissa helpotetaan kuulolaitetta käyttävien henkilöiden kuulemista



(Danalink 2012.). Ajosilmukan suorissa osissa voidaan käyttää leveää kupariteippiä ja mutkissa kapeaa teippiä, joka taipuu paremmin.

Kupariteippi voidaan jatkaa juotosliitoksella. Johtimena voidaan käyttää myös alumiiniteippiä. Alumiiniteippiin on kuitenkin vaikea tehdä luotettava jatkoliitos, koska alumiinin juottaminen tapahtuu kovajuotoslämpötilassa ja alumiinin pinnassa oleva oksidikerros pitää saada pois.

Lattiaan upotettu johdin on työläämpi asentaa, koska sitä varten tarvitsee jyrsiä lattiaan ura koko johtimen matkalle. Pinta-asennus vaatii vähemmän työtä, mutta ei ole esteettisesti yhtä siisti kuin lattiaan upotettu johdin. Lisäksi johtimen vaurioituminen on todennäköisempää pinta-asennuksessa.

Ajojohdin tyypiksi valittiin pinta-asennettava kupariteippi, koska sen reittiä on helppo muuttaa tarvittaessa jälkikäteen toisin kuin lattian sisään kiinteästi asennetun johtimen.

Ajojohdinsilmukan suorilla osuuksilla voidaan käyttää esimerkiksi 40 mm levyistä ja 30 µm:n paksuista kupariteippiä. Mutkissa voidaan käyttää saman paksuista, mutta 10 mm leveää kupariteippiä, jota pystyy taivuttamaan pienemmällä säteellä.

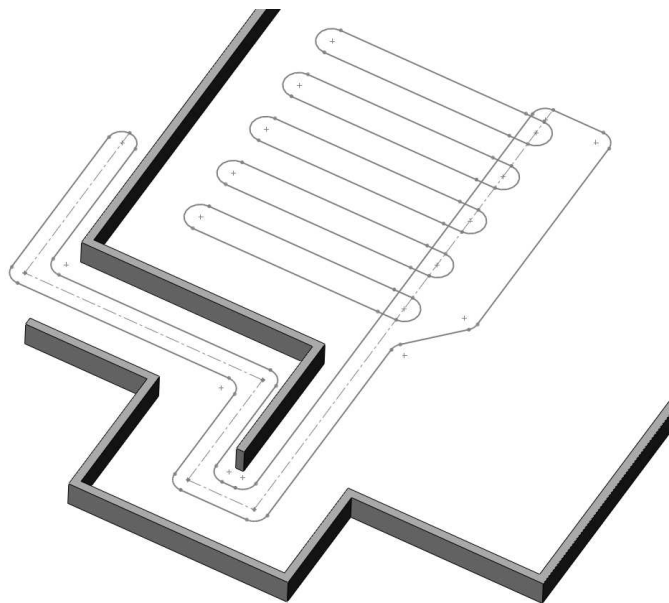
Ajojohtimen maksimipituus määräytyy käytettävän syöttöjännitteen, johtimessa kulkevan virran, materiaalin resistiivisyyden ja johtimen poikkipinta-alan mukaan. Ajojohtimessa kulkevan virran tulee olla noin 100 mA, jotta johtimen magneettikenttä voidaan havaita luotettavasti vihivaunussa sijaitsevalla kela-anturilla. Ajojohtimen pituuden mitoituksessa voidaan käyttää 200 mA:n virtaa. Lasketaan 40 mm:n levyisen ja 30 µm:n paksuisen kuparijohtimen maksimipituus kaavalla 20, kun syöttöjännite 24 V, virta 200 mA ja kuparin resistiivisyys 17,2 nΩm.

Kaava 20. Ajojohtimen maksimipituus.

$$l = \frac{U \cdot A}{I \cdot \rho}$$

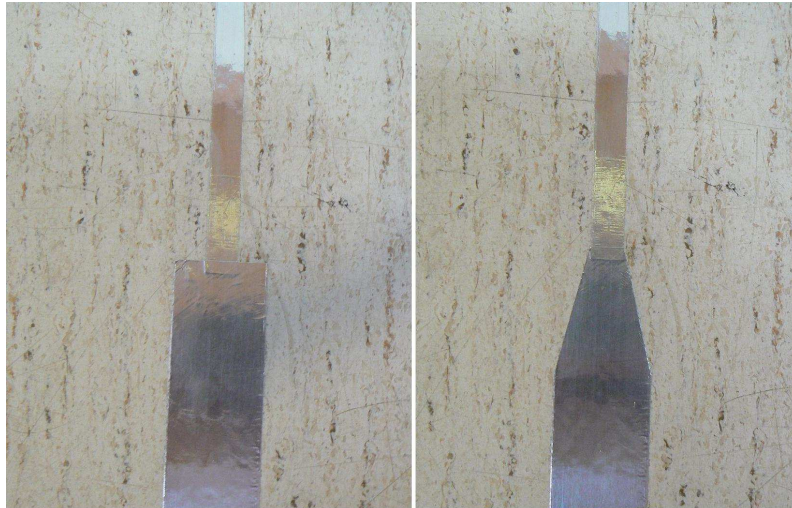
$$l = \frac{24V \cdot 0,04m \cdot 30 \cdot 10^{-6}m}{0,2A \cdot 17,2 \cdot 10^{-9}\Omega m} = 8372m$$

Todellisuudessa johtimen pituus on lyhyempi, koska ajojohtimelle tuodaan syöttö erillisellä kaapelilla, jonka resistanssia ei ole tässä otettu huomioon. Pituus lyhenee myös mikäli ajojohdinsilmukassa käytetään esimerkiksi mutkissa kapeampaa kuparijohdinta. Ajojohtimien pituudet voidaan mitoittaa käyttämällä apuna asennuskohteen pohjapiirustusta (kuva 16).



Kuva 16. Ajojohtimien mitoitus rakennuksen pohjapiirustuksen avulla.

Ajojohtimena käytettävän kupariteipin jatkoliitoksesta saadaan siisti ja luotettava juottamalla liitos lyijyttömällä juotospastalla ja viistämällä leveämmän teipin reunat (kuva 17).



Kuva 17. Ajojohtimena käytetyn alumiiniteipin jatkoliitos.

Lattiamateriaali vaikuttaa oleellisesti kupariteipin kiinnipysyvyyteen. Puhtaaseen pinnoitettuun betonilattiaan teippi tarttuu paremmin kuin käsittelemättömään betonipintaan. Kupariteipin omaan liimapintaan ei välttämättä voida luottaa, joten ajojohdin voidaan liimata lattiaan käyttämällä 2-komponentti epoksiliimaa. Epoksiliimaa voidaan levittää myös ajojohtimen päälle, jolloin se kestää paremmin mekaanista rasitusta.

### 6.3 Ajojohtimen virtavahvistin

Virtavahvistimella tarkoitetaan laitetta, joka synnyttää vaihtovirran ajojohtimeen (Liite 2). Virtavahvistin koostuu mikrokontrollerista ja pääteasteesta. Mikrokontrollerilla muodostetaan halutun taajuinen 5 V:n kanttiaalto, jolla ohjataan virtavahvistimen pääteastetta. Pääteaste koostuu MOSFET-transistoreista, joilla on toteutettu H-siltakytkentä. Transistoreilla toteutetulla H-siltakytkennällä voidaan kääntää toimilaitteelle syötetyn tasavirran napaisuus ilman sähkömekaanisia komponentteja. Tässä tapauksessa toimilaitteena on RLC-sarjapiiri (kuva 18), jonka kanssa on sarjaan kytettynä ajojohdin.



Kuva 18. RLC-sarjapiiri.

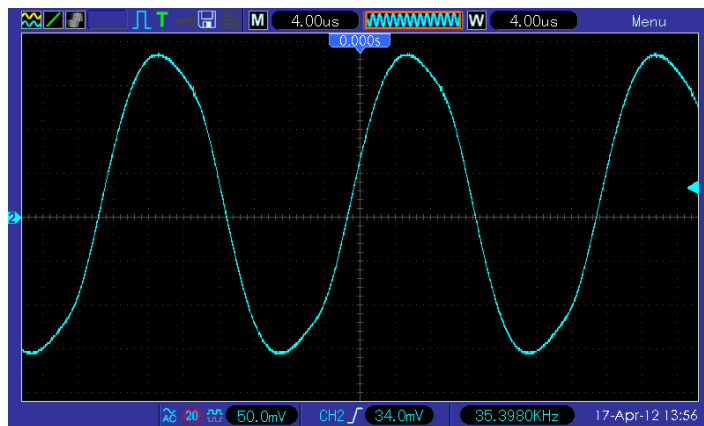
RLC-sarjapiirissä kulkeva virta on suurimmillaan sen resonanssitaajudella. Resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla 21.

Kaava 21. RLC-sarjaresonanssipiirin resonanssitaajuus.

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Pääteaste syöttää vahvistetun kanttiaaltosignaalin RLC-sarjapiiriin, jossa virta muotoutuu siniaalloksi. Ajojohtimessa kulkevan virran voimakkuus saadaan säädettyä jänniteregulaattoriin IC1 kytketyllä säätövastuksella R1.

Kuvassa 19 on tyypillinen ajojohtimessa kulkevan virran aaltomuoto. Virta on mitattu kytkemällä 1 ohmin vastus sarjaan ajojohtimen kanssa, jonka yli mitattu jännite vastaa 1 A/V. Virta on lähes sinimuotoinen, joten virran tehollisarvo saadaan laskettua jakamalla puolijakson huippujännite  $\sqrt{2}$  :lla.



Kuva 19. Ajojohtimessa kulkevan virran aaltomuoto.

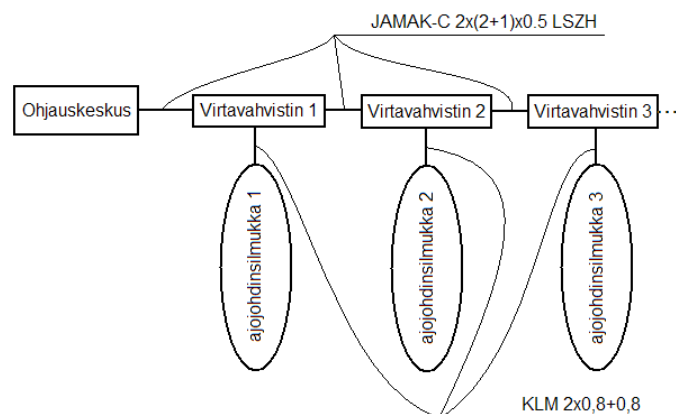
Huipusta huippuun jännite on n. 6,8 ruutua ja 1 ruutu vastaa 34 mV:a.

$$I_{RMS} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

$$I_{RMS} = \frac{6,8 \frac{A}{V} \cdot 0,034V}{2 \cdot \sqrt{2}} = 0,0817A \approx 82mA$$

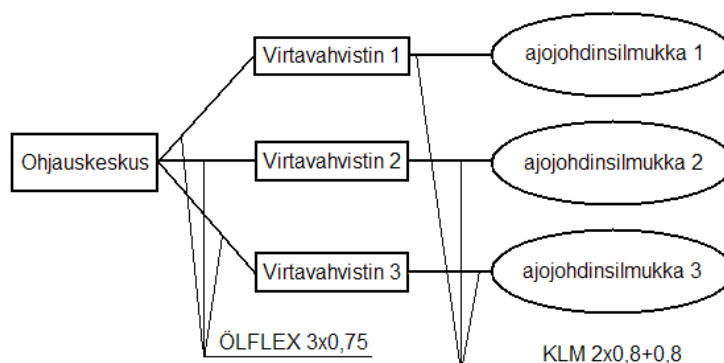
Ajojohtimessa kulkevan virran voimakkuus määräytyy kela-anturissa käytettyjen kelojen ja kelojen jännitettä mittaavan vahvistimen vahvistuksen mukaan. Virtavahvistimen pääteasteesta saatava maksimivirta on 23 A, mikäli transistorien riittävästä jäähdytyksestä huolehditaan. Käytännössä ajojohtimeen ei johdeta yli 500 mA:n virtaa, koska jo 100 mA:n virralla magneettikenttä oli riittävän voimakas 50 mm:n etäisyydellä, joka pystyttiin mittaamaan luotettavasti prototyyppiä testattaessa.

Mikäli vihivaunun reititys vaatii useamman kuin yhden ajojohdin silmukan, täytyy ajojohdinsilmukoilla olla omat virtavahvistimet. Virtavahvistimien kaapelointi voidaan toteuttaa kuvan 20 tai 21 mukaisesti. Kuvassa 20 virtavahvistimien tilatiedot ja ohjaus välitetään RS-485 sarjaväylän avulla. Jokainen väylällä oleva virtavahvistin saa tällöin virran samasta johdinparista. Vahvistin kytketään väylälle liittimellä X3 ja väylää jatketaan liittimestä X4.



Kuva 20. Väyläkytketyt virtavahvistimet.

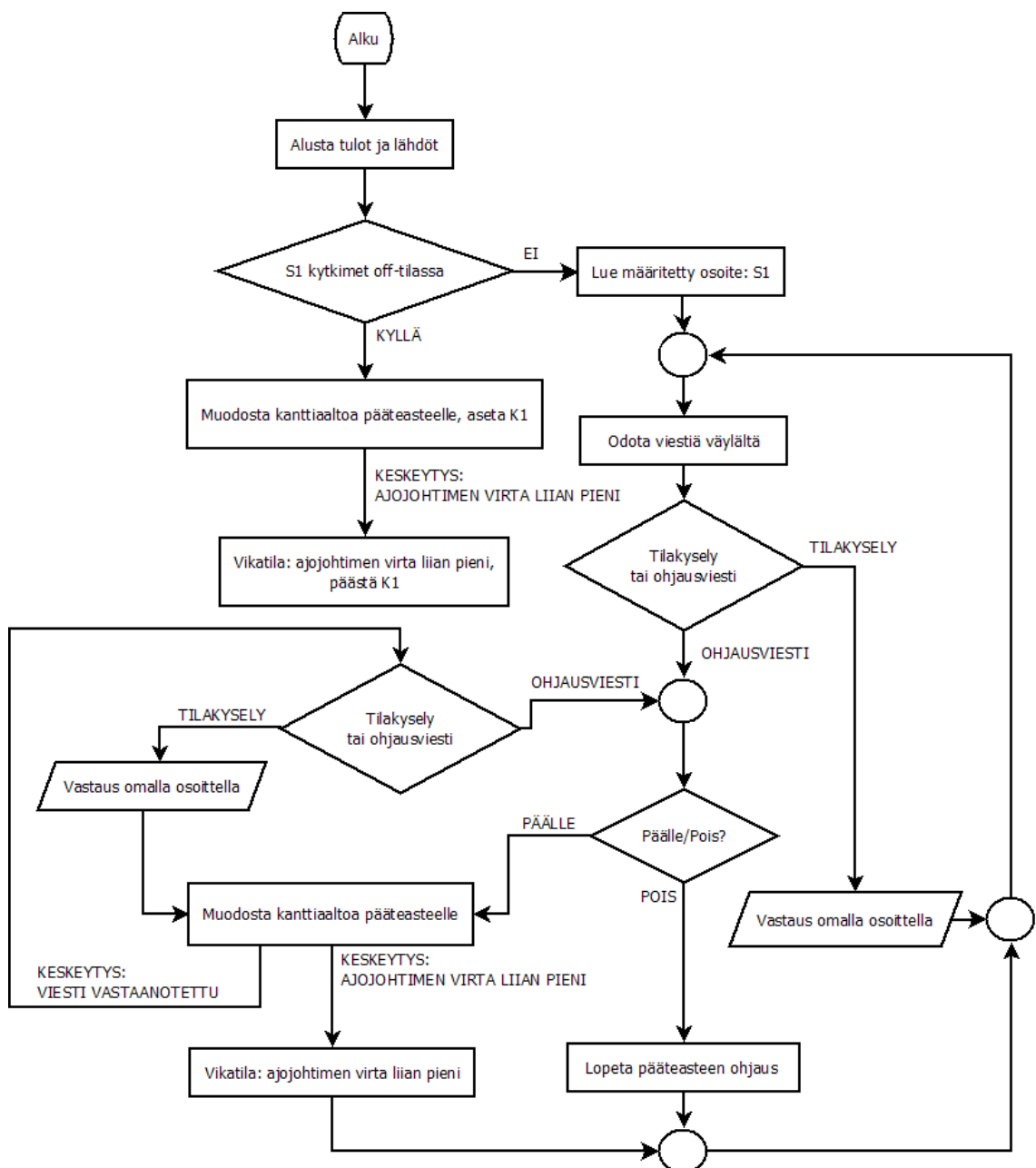
Kuvan 21 toteutuksessa jokaiselle virtavahvistimelle menee oma ohjaus- ja tilatiedon välittävä kaapeli. Virtavahvistimen tilatieto saadaan loogisena 24 V:n signaalina liittimestä X1-2.



Kuva 21. Tähtikytketyt virtavahvistimet.

Virtavahvistimen toimintatapa valitaan DIP-kytkimellä S1, joka koostuu neljästä kytkimestä. Tähtikytkentätila valitaan asettamalla kaikki neljä kytkintä off-tilaan. Väyläkytkentätilassa virtavahvistimen 4 bittinen osoite asetetaan kytkimellä S1. Väylässä voi olla enintään 15 vahvistinta. RS-485 väylää käytettäessä ensimmäisen ja viimeisen laitteen päätevastukset kytketään päälle asettamalla DIP-kytkimen S2 kytkin 3 tai 4 päälle.

Virtavahvistimen mikrokontrollerin ohjelma toteutetaan kuvion 1 mukaisesti. Virtavahvistimia voidaan hallita tähtikytkettynä (kuva 21) ohjelmoitavalla logiikalla, tai väyläkytkettynä (kuva 20) RS-485 väylän kautta uniikilla protokollalla. RS-485 määrittelee vain väylän sähköiset ominaisuudet, joten kommunikointiprotokolla virtavahvistimia ohjaavan keskusyksikön ja virtavahvistimien välille täytyy määrittää erikseen.

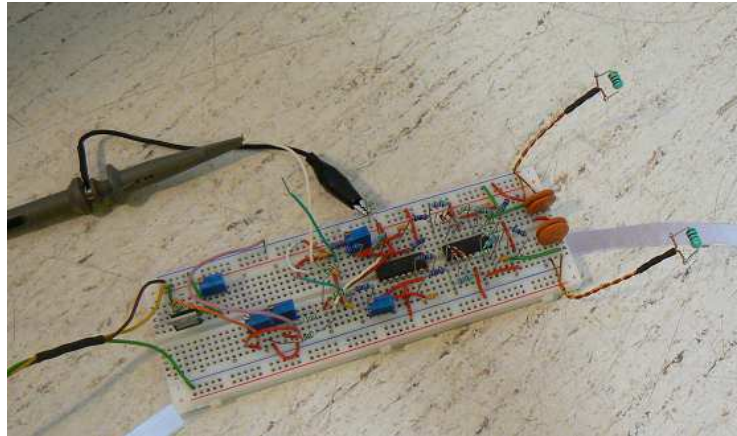


Kuvio 1. Virtavahvistimen mikrokontrollerin ohjelman vuokaavio.

#### 6.4 Navigointianturin prototyyppin testaus

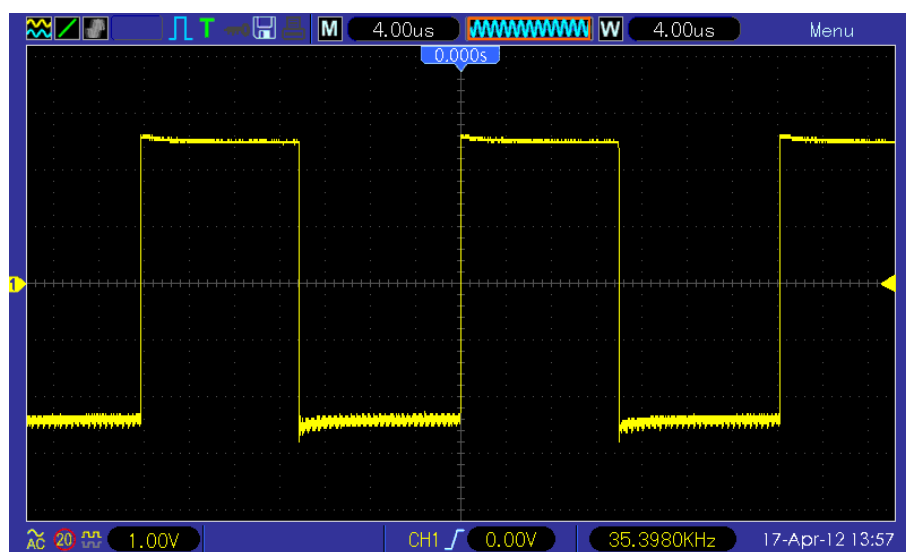
Liitteen 1 navigointianturin kytkentä koottiin koekytkentälevylle käyttäen jalallisia komponentteja (Kuva 22). Vastaanotinkeloina käytettiin pieniä 1 mH:n aksiaalisia kuristinkeloja, joiden rinnalle kytkettiin 20 nF:n kapasitanssit. Rinnakkaisresonanssipiirin taajuudeksi laskettiin 35,5 kHz. Kelojen jalkoja

jatkettiin kierretyllä johdinparilla, jolloin kelojen etäisyyttä ajojohtimeen ja toisiinsa nähden pystyttiin muuttamaan helposti.



Kuva 22. Vastaanottimen prototyyppi koekytkentälevyllä.

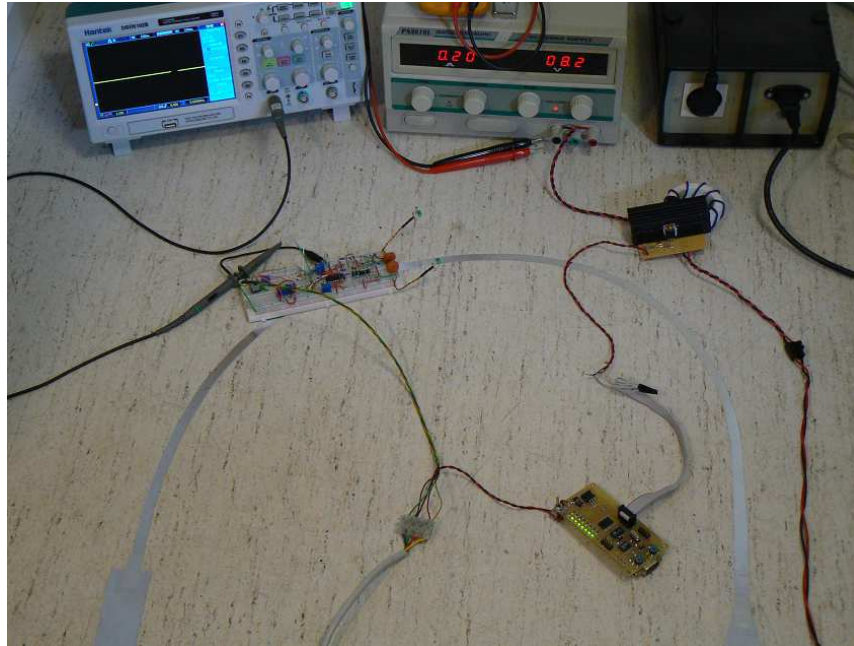
Navigointianturin testausta varten tarvittiin myös ajojohtimen virtavahvistin, jotta ajojohtimeen saatiin muodostettua vaihtovirta. Liitteen 2 virtavahvistinkytkentä toteutettiin H-siltakytketyllä pääteasteella, jota ohjattiin erillisellä mikrokontrollerin kehitysalustalla. Mikrokontrolleri ohjelmoitiin tuottamaan 35,5 kHz:n kanttiaaltoa (kuva 23), jolla ohjattiin pääteastetta.



Kuva 23. Mikrokontrollerin tuottama pääteasteen ohjaussignaali.

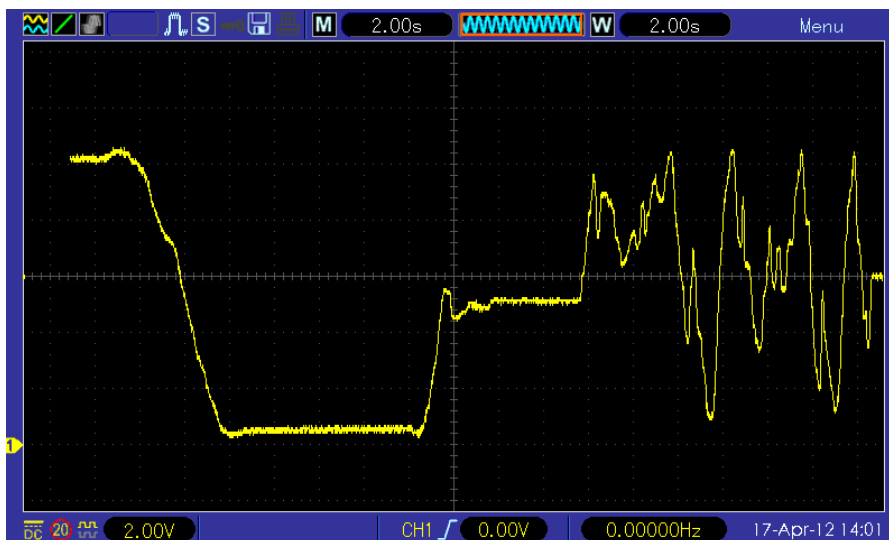


Pääteaste koottiin juottamalla verolevyille. Ajojohtimena käytettiin 10 mm:n ja 40 mm:n levyistä alumiiniteippiä. Teipin paksuus oli 30  $\mu\text{m}$ . 40 mm:n teippiä käytettiin reitin suorillaosilla ja 10 mm:n teipistä muodostettiin kaari, jonka säde oli 250 mm (kuva 24).



Kuva 24. Kela-anturin ja virtavahvistimen testikokoonpano.

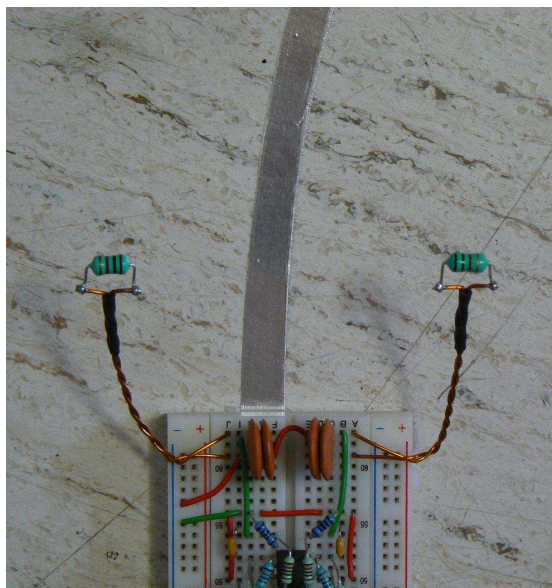
Kela-anturi kalibroitiin ajojohtimen suoralla osuudella siten, että anturilta saatava jänniteviesti oli 5 V, kun ajojohdin oli kelojen puolivälissä. Anturilta saatava jänniteviesti oli 0 V tai 10 V riippuen siitä kumpi keloista oli ajojohtimen päällä. Kelojen poikkeamaa ajojohtimeen nähden muutettiin käsin. Kuvassa 25 on anturilta saatu 0...10 V:n jänniteviesti, jossa vasemmalta oikealle katsottuna 10 V, 0 V, 5 V ja satunnaisen liikuttelun muodostama jänniteviesti.



Kuva 25. Kela-anturilta saatava 0...10 V:n jänniteviesti.

Anturia testattiin myös eri suuruisilla ajojohtimen virroilla. Kelojen sijaitessa 80 mm:n etäisyydellä toisistaan ja 50 mm:n etäisyydellä pinnasta, jossa ajojohdin kulki, havaittiin, että kela-anturin vahvistus ei ollut enää 50 mA:n ajojohtimen virralla riittävä muodostamaan 0...10 V:n jänniteviestiä. Kelojen sijoittaminen lähemmäksi toisiaan ei vaikuttanut tulokseen. Magneettikentän voimakkuus ei ollut riittävä, jolloin koekytkenässä käytettyihin keloihin indusoitunutta jännitettä ei pystytty enää vahvistamaan riittävälle tasolle. Pienin virta, jolla anturilta saadaan luotettava jänniteviesti riippuu käytetyistä keloista. Kela-anturin koekytkenässä käytetyt kelat olivat pieniä halkaisijoiltaan, joten käyttämällä 1 mH:n keloja, joiden sydämien poikkipinta-alat ovat suurempia saataisi 0...10 V:n jänniteviesti muodostettua pienemmällä ajojohtimen virralla, kun etäisyys ajojohtimeen pysyy vakiona.

Ajojohtimen eri muotojen vaikutusta kela-anturilta saatavaan jänniteviestiin tarkasteltiin ajojohtimen erilevyisissä osissa, kurvissa sekä liitoskohdissa. Kurvissa, jonka säde oli 250 mm havaittiin, että ajojohdin ei ollut keskellä keloja, kun jänniteviesti oli 5 V. Kelojen keskikohta oli hieman sisäkurvin puolella (kuva 26). Ilmiö johtuu siitä, että magneettikentän voimakkuus on hieman suurempi kurvin sisäpuolella. Tämä ominaisuus ei vaikuta haitallisesti vihivaunun liikkumiseen.



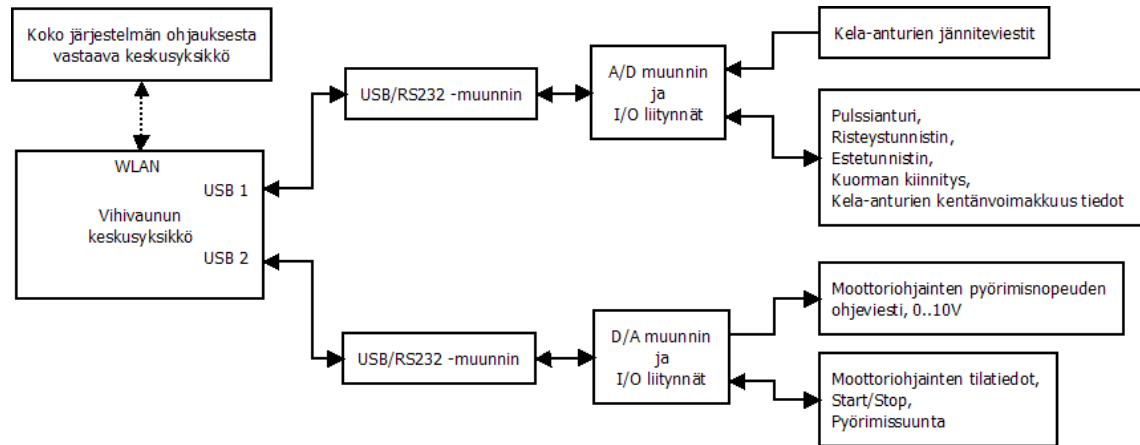
Kuva 26. Magneettikentän voimakkuus suurempi sisäkurvissa.

Ajojohtimen erilevyisten osien liitoskohdan mahdollista vaikutusta jänniteviestiin tarkasteltiin liikuttamalla kela-anturia kuvassa 17 esitettyjen liitoskohtien yli. Äkillisiä muutoksia jänniteviestissä ei esiintynyt kuljettaessa liitoskohtien yli. Ajojohtimen jatkoliitos voidaan siis toteuttaa kummallakin tavalla, mutta viistetty liitos on siistimmän näköinen.

## 7 VIHIVAUNUN TOIMINTAPERIAATE

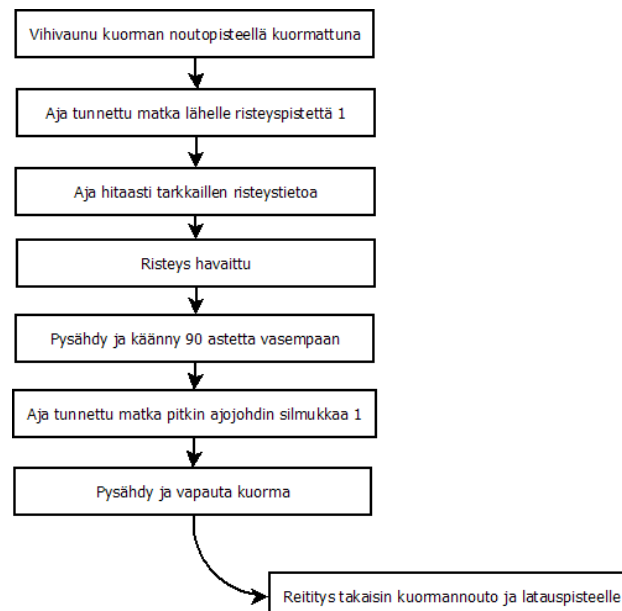
Vihivaunu navigoi ajojohtimesta muodostetulla reitillä mittaamalla lattiassa kulkevan ajojohtimen poikkeamaa vihivaunun ajojohtimen seurantaan tarkoitetuilla kela-antureilla (liite 1) sekä laskemalla pulssianturilla vaunun kulkemaa matkaa. Mahdolliset ajojohtimen risteyspisteet tunnistetaan erillisellä kela-anturilla, joka on sijoitettu vihivaunun pohjaan 90°:een kulmaan navigointiantureihin nähden. Ajojohtimen seurantaan käytettävältä kela-anturilta saatavasta analogisesta jänniteviestistä muodostetaan A/D-muuntimella (Liite 3) digitaalinen viesti. Vihivaunun keskusyksikössä tästä digitaalisesta viestistä muodostetaan ohjausviesti harjattomille tasavirtamoottorien ohjaimille (Maxon motor, 2012c). Digitaalinen ohjausviesti syötetään D/A-muuntimelle (Liite 4),

josta analoginen viesti välitetään harjattomien tasavirtamoottoreiden ohjaimille. Ajo-ohje, jonka mukaan vihivaunun tulee kulkea lähetetään WLAN -yhteyden yli koko järjestelmää hallinnoivalta keskusyksiköltä (kuvio 2).



Kuvio 2. Vihivaunun sisäinen viestinvälitys.

Ajo-ohjeen mukaisen reitin suorittaminen aloitetaan aina tunnetusta pisteestä. Esimerkiksi liitteen 5 mukaisella reitityksellä ajo-ohje voi olla kuvion 3 mukainen vietäessä kuorma noutopisteeltä risteävän ajojohtimen 1 päähän.



Kuvio 3. Ajo-ohjeen rakenne.

## 8 TULOKSET

Opinnäytetyöni tuloksena syntyi hahmotelma pienikokoisen vihivaunun toiminnasta ja toteutuksesta. Työn tuloksena selvisi, että vihivaunun navigointiin ja kuorman kuljettamiseen tarvittavat komponentit on mahdollista valmistaa ja asentaa vihivaunulle määritettyyn tilaan. Vihivaunun kiihtyvyyttä rajoittavat tekijät voimansiirrossa ja dollyvaunun tyypilliselle kuormalle saatiin selvitettyä.

Lisäksi työssä saatiin selvitettyä vihivaunun navigointiin tarvittavien komponenttien ja dollyvaunun kuorman liikuttamisen tarvittavan voimansiirron vaatimaa energian kulutus. Vihivaunulle saatiin valittua tarkoitukseen sopiva akkutyyppi. Valitulla navigointitavalla vihivaunun reititys on helposti toteutettavissa ja muutettavissa tarpeen vaatiessa. Jotta vihivaunusta saataisi valmistettua toimiva laite, vaatii se vielä jatkokehitystä mekaniikan ja ohjelmiston osalta, sekä kaikkien osa-alueitten testausta. Toteutus ei ole riippuvainen markkinoilla olevista AGV järjestelmäintegraattoreista, sillä vihivaunun suunnittelussa on käytetty yleisesti saatavilla olevia komponentteja.

Vihivaunun navigointiin ja kuorman kuljettamiseen tarvittavien komponenttien sovittaminen pieneen tilaan osoittautui haasteelliseksi. Navigointielektroniikan toteuttaminen itse vaati erityistä syventymistä analogiseen elektroniikkaan ja vaihtosähkötekniikkaan. Tässä työssä minua kiinnosti kokonaisuus, josta pieni vihivaunu koostuu ja mitä asioita pienen vihivaunun toteutuksessa tulee huomioida.

## LÄHTEET

Airila M. et. al. 2003. Koneenosien suunnittelu. 4. painos. Porvoo: WSOY.

Danalink 2012. Induktiosilmukat. Viitattu 22.4.2012. [www.danalink.fi](http://www.danalink.fi) > Tuotteet > Induktiosilmukat.

Honkanen H. 2012. Akku- ja paristotekniikat. Kajaanin ammattikorkeakoulu. Viitattu. 15.4.2012. [http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/REG\\_Akku%20ja%20paristotekniikat.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/REG_Akku%20ja%20paristotekniikat.pdf).

Lehtinen, J. 2010. Electric Vehicle Charging Systems in the Helsinki Region. Diplomityö. Espoo: Aalto yliopisto.

Maxon motor 2012a. EC 90 flat. Viitattu 8.4.2012. [www.maxonmotor.com](http://www.maxonmotor.com) > Online catalog > Maxon EC motor > EC 90 flat Ø90 mm, brushless, 90 Watt, with Hall sensors.

Maxon motor 2012b. Planetary Gearhead GP 52 C. Viitattu 19.9.2012. [www.maxonmotor.com](http://www.maxonmotor.com) > Online catalog > Gear > Planetary Gearhead > Planetary Gearhead GP 52 C Ø52 mm, 4 - 30 Nm, Ceramic Version.

Maxon motor 2012c. DEC 70/10. Viitattu 19.9.2012. [www.maxonmotor.com](http://www.maxonmotor.com) > Online catalog > Controller > DEC 70/10, digital 4-Q-EC Amplifier 70 V / 10 A, speed control, current control.

Tenergy Corporation 2012a. Specification Approval Sheet. Viitattu 19.9.2012. [www.all-battery.com](http://www.all-battery.com) > Home > Categories > LiFePO4 Battery > High Capacity Prismatic LiFePO4 Batteries > 3.2V 20Ah LiFePO4 Rechargeable Battery > Download product datasheet.

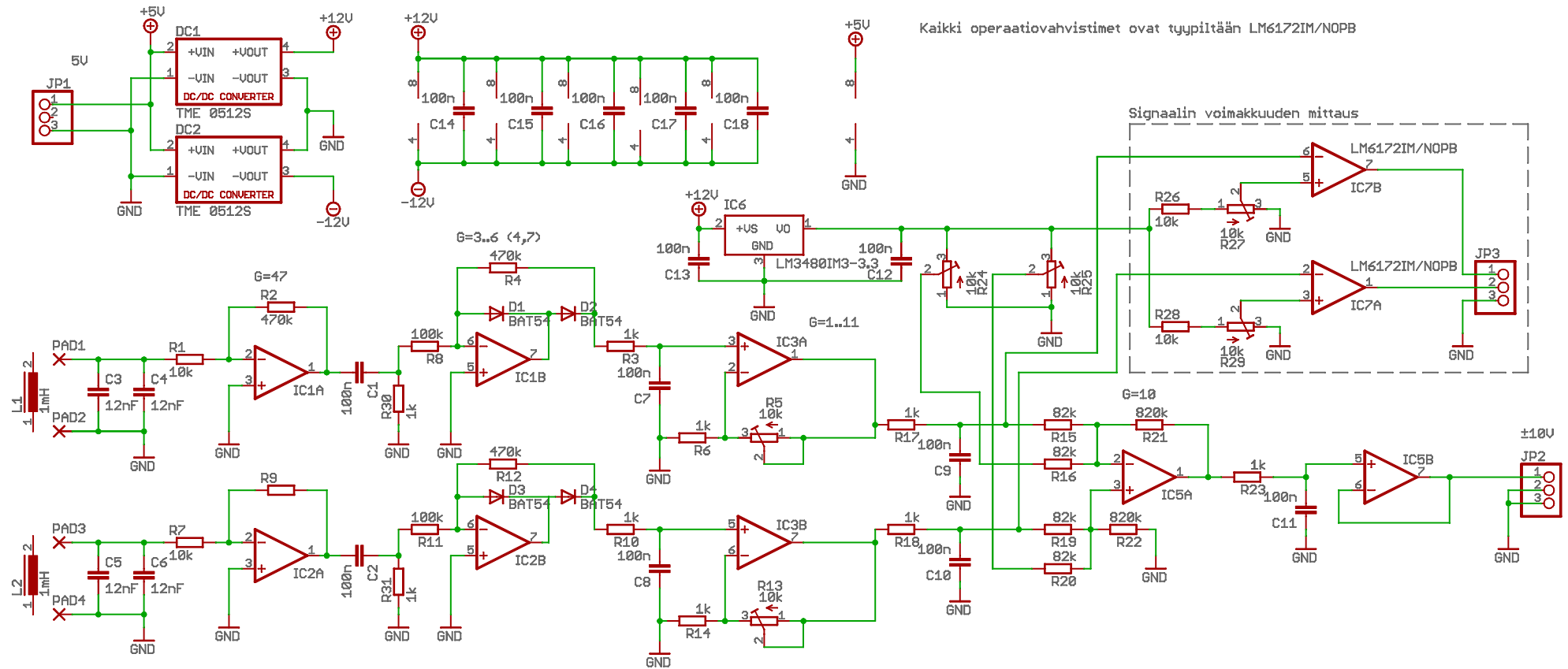
Tenergy Corporation 2012b. Ways of Line-connection. Viitattu 19.9.2012. [www.all-battery.com](http://www.all-battery.com) > Home > Categories > Battery PCB/PCM/BMS > PCB/PCM/BMS for LiFePO4 Battery Packs > Protection Circuit Module For 8 Cells LiFePO4 Battery Pack.

Tenergy Corporation 2012c. Specification Approval Sheet. Viitattu 19.9.2012. [www.all-battery.com](http://www.all-battery.com) > Home > Categories > LiFePO4 Battery > Cylindrical LiFePO4 Rechargeable Batteries > Energy Cells - LiFePO4 > Tenergy LiFePO4 Cylindrical 3.2V 5000mAh Rechargeable Battery > Download product datasheet.

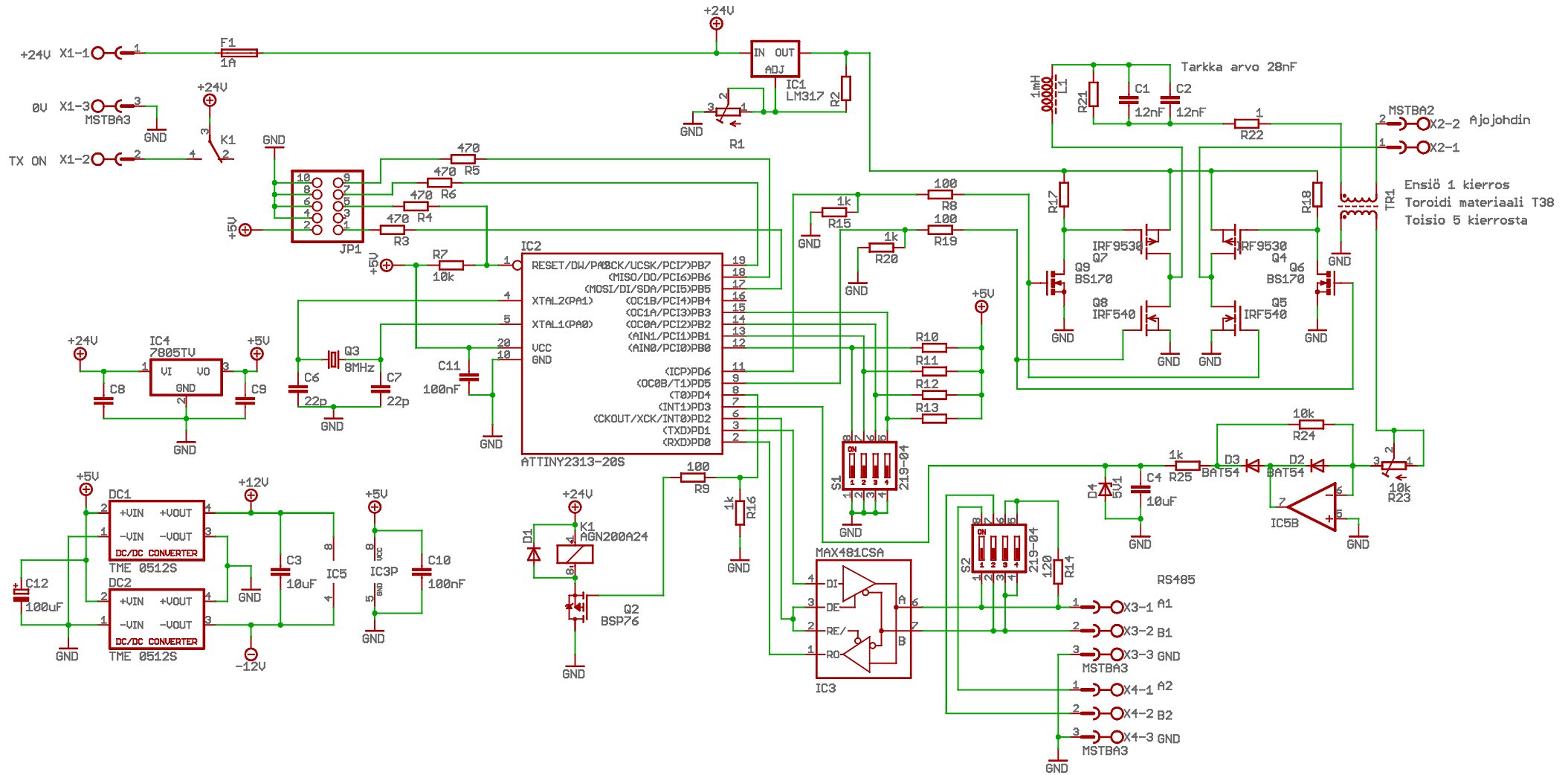
Tenergy Corporation 2012d. Tenergy 10 LiFePO4 cells in series Charger Datasheet. Viitattu 19.9.2012. [www.all-battery.com](http://www.all-battery.com) > Home > Categories > Battery Chargers > Chargers For LiFePO4 Battery Packs > 19.2 – 32v (6-10 Cell) LiFePO4 > Tenergy 28.8V (9-Cell) Intelligent 3.2A LiFePO4 Battery Pack Charger > Download product manual.

Woodbank communications Ltd 2012. Comparisons. Viitattu 15.4.2012. <http://www.mpoweruk.com/specifications/comparisons.pdf>.

## Liite 1. Ajosignaalin vastaanotin.

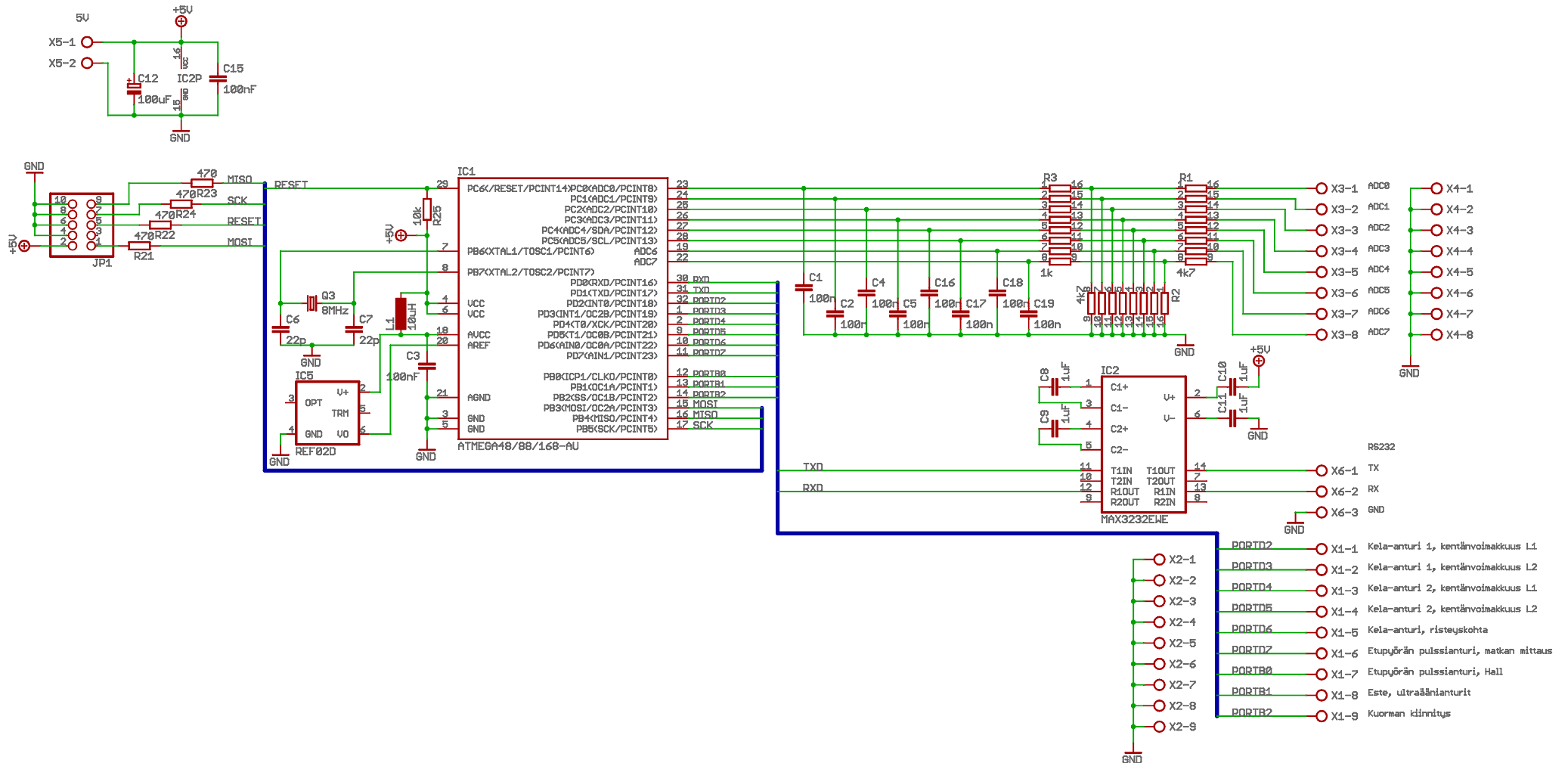


## Liite 2. Ajojohtimen virtavahvistin.





### Liite 3. A/D muunnin ja I/O.



#### Liite 4. D/A muunnin ja I/O.

